

**EVALUACION DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN APLICADOS EN LA  
INDUSTRIA MEDIANTE PRUEBAS ELECTROQUIMICAS**

**JEFFERSON ALEJANDRO SUAREZ QUINTERO**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE METALÚRGICA**

**TUNJA**

**2018**

**EVALUACION DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN APLICADOS EN LA  
INDUSTRIA MEDIANTE PRUEBAS ELECTROQUIMICAS**

**JEFFERSON ALEJANDRO SUAREZ QUINTERO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO  
METALÚRGICO**

**DIRECTOR: PhD. ENRIQUE VERA LOPEZ**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE METALÚRGICA**

**TUNJA**

**2018**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Tunja, Agosto de 2018

**“La autoridad científica de la facultad de ingeniería reside en ella misma, por tanto, no responde por las opiniones expresadas en este proyecto de investigación”.**

**Se autoriza su uso y reproducción indicando su origen.**

## **DEDICATORIA**

A Dios. Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor. A mi mami Clara por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor, a mi hermano Ferney, a mi tío Carlos quien estuvo en todo momento con su apoyo incondicional, a mis abuelos por sus consejos regaños y cariño, a mi gran amigo Juan Solano quien fue un apoyo en toda la carrera además de todos los momentos vividos, a mi amigos John Reyes, Gerardo González y Cristian Cruz por su apoyo y motivación y a todas las personas que me acompañaron durante todo el periodo de estudio.

## **AGRADECIMIENTOS**

Ph.D Enrique Vera López, por su gran apoyo y motivación para la culminación de mi carrera profesional y para la elaboración de esta tesis.

Al ingeniero Oscar Gómez, co-director por brindar de manera desinteresada sus conocimientos y asesorar todo el proceso de esta tesis.

A quienes integran el Instituto para la Investigación y la Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales “INCTEMA” por su colaboración.

Ingenieros y docentes de la escuela de Metalurgia.

A cada uno de mis compañeros que de alguna forma hicieron parte de mi trabajo.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	17
OBJETIVOS	18
GENERAL	18
ESPECÍFICOS	18
MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE	19
1.1 CORROSIÓN	19
1.1.2 Corrosión por oxígeno	20
1.1.3 Efectos de la corrosión	21
1.1.3.1 Fenómeno de la corrosión y costos del proceso	21
1.1.4 Factores influyen en la corrosión	23
1.1.4.1 Potencial eléctrico de los materiales	23
1.1.4.2 Formación de películas y biopelículas	23
1.1.4.3 Temperatura	23
1.1.4.4 Velocidad	23
1.1.4.5 Agentes oxidantes	23
1.2 INHIBIDORES	24
1.2.1 Inhibidor de corrosión	24
1.2.3 Características de los inhibidores de corrosión	25
1.2.3.1 Los inhibidores de corrosión cumplen con las siguientes características principalmente	25
1.2.3.2 Cálculo de la eficiencia de inhibidores de corrosión	26
1.3 PRUEBAS ELECTROQUIMICAS	27
1.3.1 Resistencia de polarización lineal (LPR)	27
1.3.2 Curvas de polarización (TAFEL)	28
1.3.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)	29
1.4 ESTADO DEL ARTE	32
METODOLOGIA	34

2.1 UBICACIÓN DEL PROYECTO	34
2.2 DESCRICION DE LA METODOLOGIA	34
2.2.1 Valores de las variables	34
2.2.2 Diseño metodológico	35
2.3 CARACTERIZACION DEL MATERIAL	37
2.3.1 Caracterización metalográfica	37
2.3.2. Determinación de resistencia mecánica	38
2.3.3. Análisis de micro dureza	39
2.3.4. Determinación de composición química	39
2.4 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	40
2.4.2 Control de variables	40
2.4.2.1 Material	40
2.4.2.2 Electrolito	41
2.4.2.3 Concentración del inhibidor	41
2.4.2.4 Dosificación de oxígeno	42
2.4.2.5 Temperatura	42
2.4.3. Montaje de la celda electroquímica	42
2.4.4. Pruebas electroquímicas	44
2.4.5. Análisis de los resultados	44
3. RESULTADOS Y ANALISIS	45
3.1 PREPARACION DE ELECTROLITO (FLUIDO)	45
3.2 PREPARACION DE INHIBIDOR	45
3.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	46
3.3.1 Composición química	46
3.3.2 Ensayo de tracción	46
3.3.3 Micro durómetro	48
3.3.4 Microestructura	48
3.4 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE INHIBICIÓN	49
3.4.1 Construcción de curvas de polarización tafel	49



3.4.2 Espectroscopia de impedancia electroquímica	50
3.5 RESULTADOS DE VELOCIDAD DE CORROSIÓN	51
3.5.1 Análisis de tablas, graficas TAFEL y EIS	69
3.6 ANALISIS GRAFICA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	71
3.7 APARIENCIA SUPERFICIAL DE LAS PROBETAS	75
4. CONCLUSIONES	78
5. BIBLIOGRAFÍA	79

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Variables, Niveles	35
Tabla 2. Composición Del Material	41
Tabla 3. Muestras Analizadas	42
Tabla 4. Montaje De Celda Electroquímica	43
Tabla 5. Análisis De Composición Por Espectrómetro De Chispa	46
Tabla 6. Prueba De Dureza Acero Api N-80	48
Tabla 7. Velocidades De Corrosión Y Eficiencia A 70°C Y Dosificaciones De 10 Y 30 Ppm En El Fluido Ccs-12	51
Tabla 8. Velocidades De Corrosión Y Eficiencia A 80°C Y Dosificaciones De 10 Y 30 Ppm En El Fluido Ccs-12	53
Tabla 9. Velocidades De Corrosión Y Eficiencia A 70°C, 5ppm De O <sub>2</sub> Y Dosificaciones De 10 Y 30 Ppm En El Fluido Ccs-12	54
Tabla 10. Velocidades De Corrosión Y Eficiencia A 80°C, 5ppm De O <sub>2</sub> Y Dosificaciones De 10 Y 30 Ppm En El Fluido Ccs-12	56
Tabla 11. Velocidades De Corrosión Y Eficiencia A 70°C Y Dosificaciones De 10 Y 30 Ppm En El Fluido Trs-N <sub>2</sub>	57
Tabla 12. Velocidades De Corrosión Y Eficiencia A 80°C Y Dosificaciones De 10 Y 30 Ppm En El Fluido Trs-N <sub>2</sub>	59
Tabla 13. Velocidades De Corrosión Y Eficiencia A 70°C, 5ppm De O <sub>2</sub> Y Dosificaciones De 10 Y 30 Ppm En El Fluido Trs-N <sub>2</sub>	60
Tabla 14. Velocidades De Corrosión Y Eficiencia A 80°C, 5ppm De O <sub>2</sub> Y Dosificaciones De 10 Y 30 Ppm En El Fluido Trs-N <sub>2</sub>	62
Tabla 15. Velocidades De Corrosión Y Eficiencia A 70°C Y Dosificaciones De 10 Y 30 Ppm En El Fluido Dgr 12	63

Tabla 16. Velocidades De Corrosión Y Eficiencia A 80°C Y Dosificaciones De 10 Y 30 Ppm En El Fluido Dgr 12	65
Tabla 17. Velocidades De Corrosión Y Eficiencia A 70°C, 5ppm De O2 Y Dosificaciones De 10 Y 30 Ppm En El Fluido Dgr 12	66
Tabla 18. Velocidades De Corrosión Y Eficiencia A 80°C, 5ppm De O2 Y Dosificaciones De 10 Y 30 Ppm En El Fluido Dgr 12	68
Tabla 19. Apariencia Superficial Inhibidor La-3518-C	76
Tabla 20. Apariencia Superficial Inhibidor Vx-12615	76
Tabla 21. Apariencia Superficial Inhibidor 97-Vd-129	77

## LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1. Polaridad de un inhibidor	27
Grafica 2. Resistencia de Polarización Lineal (LPR)	28
Grafica 3. Curva de polarización (TAFEL)	29
Grafica 4. Diagrama Nyquist para un sistema electroquímico simple	31
Grafica 5. Diagrama de Bode para un sistema electroquímico simple	31
Gráfica 6. Eficiencia de inhibición para una dosificación de 10 ppm de inhibidor, 0 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C	72
Gráfica 7. Eficiencia de inhibición para una dosificación de 30 ppm de inhibidor, 0 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C	73
Gráfica 8. Eficiencia de inhibición para una dosificación de 10 ppm de inhibidor, 5 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C	74
Gráfica 9. Eficiencia de inhibición para una dosificación de 30 ppm de inhibidor, 0 ppm de Oxígeno y temperatura de 70 °C	75

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tubería de transporte de crudo	19
Figura 2. Tipo de corrosión que se produce en una superficie de hierro sobre la que existe una gota de agua.	20
Figura 3. Representación esquemática del proceso de corrosión y el costo de cada etapa	22
Fuente: Estudios Comparativos de Corrosión	28
Figura 4. Diseño metodológico	36
Figura 5. Pulidora Dace Technologies NANO 200 DT	37
Figura 6. Microscopio óptico Carl Zeiss AxioTech	37
Figura 7. Máquina universal de ensayos Microtest	38
Figura 8. Probetas para máquina de tracción	38
Figura 9. Micro durómetro digital HSV-1000	39
Figura 10. Espectrómetro Q8 Magellan	39
Figura 11. probeta pruebas estaticas	40
Figura 12. Cantidad de electrolito por prueba	41
Figura 13. Pruebas estaticas a 80°C	43
Figura 14. Electrodo de trabajo	43
Figura 15. Montaje de celda electroquímica	43
Figura 16. Ensayo de tracción probetas N-80	47
Figura 17. Esfuerzo vs Deformación de probeta acero API N-80	47
Figura 18. Microestructura de un acero N-80. Microscopio metalográfico, 500x	49
Figura 19. Construcción y análisis de curvas de polarización Tafel	49
Figura 20. Construcción y análisis de curvas de polarización EIS	50
Figura 21. Curvas TAFEL a 70°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm	52

Figura 22. Curvas EIS a 70°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm	52
Figura 23. Curvas TAFEL a 80°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm	53
Figura 24. Curvas EIS a 80°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm	54
Figura 25. Curvas TAFEL a 70°C, 5ppm de O <sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm	55
Figura 26. Curvas EIS a 70°C, 5ppm de O <sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm	55
Figura 27. Curvas TAFEL a 80°C, 5ppm y dosificaciones de 10 y 30 ppm	56
Figura 28. Curvas EIS a 80°C, 5ppm de O <sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm	57
Figura 29. Curvas TAFEL a 70°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm	58
Figura 30. Curvas EIS a 70°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm	58
Figura 31. Curvas TAFEL a 80°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm	59
Figura 32. Curvas EIS a 80°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm	60
Figura 33. Curvas TAFEL a 70°C, 5ppm de O <sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm	61
Figura 34. Curvas EIS a 70°C, 5ppm de O <sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm	61
Figura 35. Curvas TAFEL a 80°C, 5ppm de O <sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm	62
Figura 36. Curvas EIS a 80°C, 5ppm de O <sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm	63
Figura 37. Curvas TAFEL a 70°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm	64
Figura 38. Curvas EIS a 70°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm	64
Figura 39. Curvas TAFEL a 80°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm	65
Figura 40. Curvas EIS a 80°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm	66
Figura 41. Curvas TAFEL a 70°C, 5ppm de O <sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm	67
Figura 42. Curvas EIS a 70°C, 5ppm de O <sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm	67
Figura 43. Curvas TAFEL a 80°C, 5ppm de O <sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm	68
Figura 44. Curvas EIS a 80°C, 5ppm de O <sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm	69

## RESUMEN

Las tuberías son vulnerables a la acción de los fluidos que transportan. Son generalmente fabricadas en aceros al carbono de baja aleación. Estos materiales, aunque son convenientes por su economía y adecuadas propiedades mecánicas, muestran de manera característica una baja resistencia a la corrosión; para controlarla en la industria petrolera se usan inhibidores. No existe, sin embargo, un solo inhibidor que se adopte a todas las situaciones. la eficiencia de un inhibidor depende no solamente de la manera en que se aplica y de las condiciones de operación que tenga el sistema, sino también de la cantidad y propiedades del producto mismo. El mecanismo de protección que proporcionan los inhibidores se da por formación de depósito sobre la superficie metálica, buscando impedir la interacción entre el metal y los iones agresivos presentes en la solución.

Este proyecto tiene como propósito la evaluación de inhibidores de corrosión aplicados en la industria mediante pruebas electroquímicas, en un acero API N – 80 a condiciones críticas de temperatura, concentración de inhibidor y dosificaciones de oxígeno para controlar el sistema.

La evaluación se realizará por medio de técnicas electroquímicas tales como: resistencia a la polarización lineal (LPR), espectroscopia de impedancia (EIS), TAFEL y análisis de morfología de corrosión en el microscopio de alta resolución.

## **ABSTRACT**

The pipes are vulnerable to the action of the fluids they transport. They are usually made of low alloy carbon steels. These materials, although they are convenient for their economy and suitable mechanical properties, typically show a low resistance to corrosion; To control it in the oil industry, inhibitors are used. There is not, however, a single inhibitor that is adopted in all situations. The efficiency of an inhibitor depends not only on the manner in which it is applied and on the operating conditions of the system, but also on the quantity and properties of the product itself. The protection mechanism provided by the inhibitors is given by deposit formation on the metal surface, seeking to prevent the interaction between the metal and the aggressive ions present in the solution.

The purpose of this project is the evaluation of corrosion inhibitors applied in the industry by means of electrochemical tests, in an API N - 80 steel at critical temperature conditions, concentration of inhibitor and oxygen dosages to control the system.

The evaluation will be carried out by means of electrochemical techniques such as: resistance to linear polarization (LPR), Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), TAFEL and analysis of corrosion morphology in the high-resolution microscope.



## INTRODUCCION

Existen varios métodos para el control de la corrosión de los materiales dependiendo de sus características y de los medios industriales o naturales a los que estos materiales estén expuestos. Los métodos más utilizados incluyen los recubrimientos protectores metálicos y orgánicos, aleaciones resistentes a la corrosión, plásticos y polímeros, inhibidores de corrosión y protección catódica. En comparación con los otros métodos para controlar el proceso de corrosión, los inhibidores en muchos casos ha resultado ser una opción rentable y de fácil aplicación. El propósito de un inhibidor es evitar y disminuir la formación de herrumbre o corrosión en el metal y así evitar algún problema posterior. Este se inyecta en las líneas de transporte y equipo de refinación, para evitar la formación de corrosión y que el crudo salga con residuos no deseables al final del proceso.

La eficiencia de los inhibidores estará en función de la absorción de una película delgada, que se forme sobre la superficie del material expuesto al medio corrosivo, que deberá estar constituida por unos precipitados protectores que no se puedan remover fácilmente. En todos los países productores de hidrocarburos, las tuberías de acero son el medio más seguro, efectivo y económico para el transporte <sup>1</sup> del petróleo y gas natural, sin embargo, debido a los frecuentes cambios en las condiciones de trabajo y el tipo de crudo, se tiene un aumento en la velocidad de corrosión, la cual afecta directamente las propiedades mecánicas del acero con el que están construidas dichas instalaciones. De ahí la necesidad de evaluar la eficiencia en el laboratorio de inhibidores suministrados por el mercado para controlar este tipo de corrosión.

Existen actualmente diferentes técnicas para la evaluación de inhibidores de corrosión que pueden ser a partir de pruebas gravimétricas y electroquímicas siendo las más empleadas las electroquímicas. Estas técnicas de evaluación son resistencia a la polarización lineal (LPR), espectroscopia de impedancia (EIS), y TAFEL. De esta forma se puede dar la certeza de la eficiencia de un inhibidor de corrosión.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Evaluar inhibidores comerciales de corrosión en diferentes condiciones de operación, mediante pruebas electroquímicas.

### **ESPECÍFICOS:**

1. Identificar cuál de los inhibidores es más efectivo y en que concentración de acuerdo con los parámetros determinados.
2. Determinar el comportamiento de inhibición de la corrosión, estableciendo la mejor característica protectora en relación de las condiciones evaluadas.
3. Analizar por medio de técnicas de espectroscopia de impedancia electroquímica el comportamiento de cada inhibidor a diferentes temperaturas y dosificaciones de oxígeno.
4. Identificar cada variable como: (temperatura, dosificación en ppm de cada inhibidor y dosificación de oxígeno) y su influencia en la formación de capas sobre la superficie del sustrato por parte del inhibidor.

## MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE

### 1.1 CORROSIÓN

La palabra “corroer” se deriva del latín “corrodere”, que significa “roer las piezas”. El fenómeno de corrosión guarda gran similitud frente dicha definición etimológica, por lo cual, se define al fenómeno de la corrosión como la transformación de un material debido a reacciones químicas o electro químicas con el medio que lo rodea, lo cual produce un deterioro del material y de sus propiedades.<sup>1</sup>

La corrosión es también considerada una oxidación acelerada y continua que desgasta, es decir, que para que exista el fenómeno de corrosión tiene que haber un proceso de oxidación previo; dicho proceso ocurre cuando un átomo inestable pierde un electrón, lo que permite que el átomo forme un compuesto nuevo con otro elemento, es decir, el proceso se caracteriza por ceder electrones del elemento que se oxida al elemento oxidante. Obsérvese en la figura 1 tubería de transporte de crudo.<sup>2</sup>

**Figura 1.** Tubería de transporte de crudo.



**Fuente:** piping solutions international DWS LLC

O siempre que se presenta la oxidación de un metal existe corrosión, en algunos casos el óxido formado es resistente y forma una capa gruesa de óxido que impide

---

<sup>1</sup> Genescá, L. J. y Ávila M., J. (1999). Más allá de la herrumbre. México: Fondo de Cultura Económica (Col. La Ciencia para Todos). Otero H., E. (1997). Corrosión y degradación de los materiales. Madrid: Síntesis.

<sup>2</sup> H. H. Uhlig. Uhlig's Corrosion Handbook 2da ed. ed. R. W. R John Wiley & Sons, Londres, 2000.

que el resto del material continúe oxidándose. Este fenómeno es común en materiales de aluminio, zinc y magnesio.<sup>3</sup>

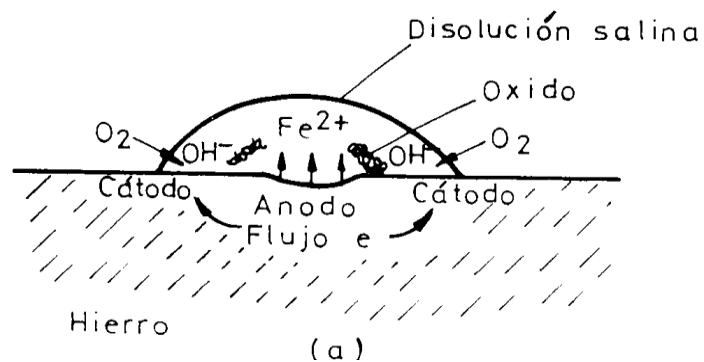


### 1.1.2 Corrosión por oxígeno

Este tipo de corrosión ocurre generalmente en superficies expuestas al oxígeno diatómico disuelto en agua o al aire, se ve favorecido por altas temperaturas y presión elevada. El oxígeno presente en una tubería, por ejemplo, está expuesto a diferentes presiones parciales del mismo. Es decir, una superficie es más aireada que otra próxima a ella y se forma una pila. El área sujeta a menor aireación (menor presión parcial) actúa como ánodo y la que tiene mayor presencia de oxígeno (mayor presión) actúa como un cátodo y se establece la migración de electrones, formándose óxido en una y reduciéndose en la otra parte de la pila. Este tipo de corrosión es común en superficies muy irregulares donde se producen obturaciones de oxígeno.<sup>4</sup>

Un ejemplo de corrosión en los que la disolución en contacto con el metal contiene diferentes cantidades de oxígeno en distintas regiones se muestra en la figura 2:

**Figura 2.** Tipo de corrosión que se produce en una superficie de hierro sobre la que existe una gota de agua. La corrosión se da en el centro de la gota.



**Fuente:** corrosión y procesos de corrosión

<sup>3</sup> [Bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/masallla.htm](http://Bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/masallla.htm)

<sup>4</sup> INTN, "corrosión y protección anticorrosiva" Capítulo IV Corrosión Electroquímica 25-27

### 1.1.3 Efectos de la corrosión

Los efectos de la corrosión en la sociedad se observan tanto de manera directa, afectando la vida útil de servicio de los bienes; y de manera indirecta, en el momento en que los productores y consumidores de los bienes tienen influencia sobre los costos de la corrosión. Estos efectos se evidencian diariamente en distintas áreas, por ejemplo, es muy común observar que un automóvil, unas ventanas o herramientas metálicas sufran de este fenómeno. Sin embargo, los efectos de la corrosión son de extremo cuidado. Por ejemplo, en un puente puede ocurrir la corrosión de alguna varilla de acero de refuerzo del concreto, la que puede fracturarse y provocar el fallo o colapso de la estructura por completo; esto no solo afectaría a la sociedad sino también al medio ambiente. Ahora, supongamos el transporte de petróleo crudo a través de buques. Si no se tiene el adecuado mantenimiento del buque, se puede producir una rotura en su casco y el petróleo sería derramado al mar, causando un daño muy grande al ecosistema marino.<sup>5</sup>

Entonces, se tiene que hacer un análisis continuo y aplicar los distintos factores que permitan evitar este tipo de situaciones que pueden llegar a ser peligrosas para la sociedad y medio ambiente.

**1.1.3.1 Fenómeno de la corrosión y costos del proceso:** por supuesto, todos los efectos sociales tienen que ver con la economía. Es por eso que hay muchas razones de buscar alternativas para controlar la corrosión.<sup>6</sup>

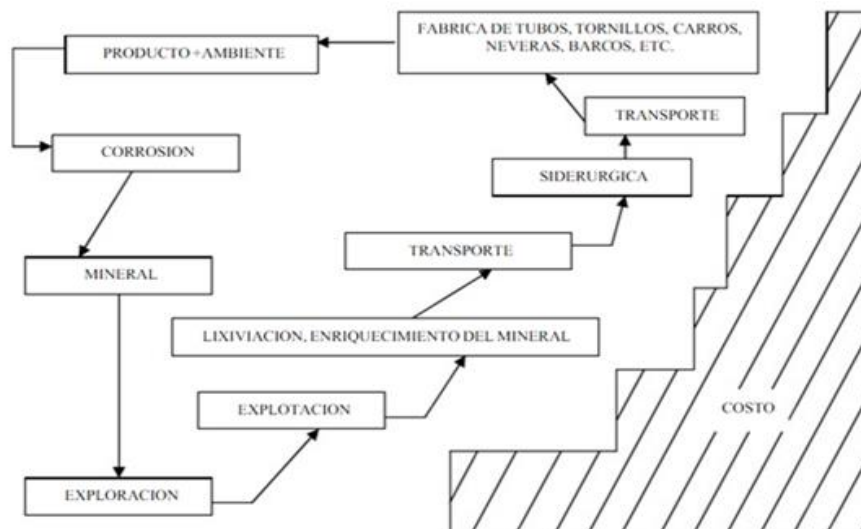
La corrosión causa pérdidas enormes y desgracias incalculables, debidas a accidentes producidos por la rotura de piezas debilitadas. Esto ocasiona que la corrosión sea responsable de que de 1/4 a 1/3 de la producción mundial de acero se dedique a la reposición de las estructuras metálicas deterioradas. Esto es un desarrollo cuyo proceso arranca desde la creación del producto, es decir, en la explotación de los yacimientos para la extracción de los minerales presentes hasta el mantenimiento de la pieza, una vez construida. Las etapas de este desarrollo y la energía utilizada generan costos específicos que pueden ser elevados, por lo cual, no cabe la menor duda de que ningún proyecto quisiera perder dicha inversión. He aquí, la importancia del mantenimiento continuo de los materiales. A continuación, se observa el ciclo natural al que tiende un material y el costo involucrado en las operaciones de exploración, explotación y enriquecimiento del

---

<sup>5</sup> Charng T. y Lansing F. (1982). Review of Corrosion causes and corrosion control in a technical facility. NASA Technical Reports, TDA Progress Report 42-69, pp. 145-156.

<sup>6</sup> Revie R. W. y Uhlig H. H.(2008). Corrosion and Corrosion Control – An Introduction to Corrosion Science and Engineering. Wiley & Sons, Inc: USA.pp. 53-58.

**Figura 3.** Representación esquemática del proceso de corrosión y el costo de cada etapa



A través de avances científicos en distintas ramas incluyendo a la termodinámica, se ha logrado determinar el posible comportamiento de un metal en un ambiente dado. En las predicciones que aporta la termodinámica, se han planteado algunas bases teórico-prácticas a partir del concepto energético: sí el sistema formado por el metal y el medio ambiente posee una energía libre positiva, es posible que tenga lugar la corrosión. La energía de un determinado sistema puede medirse en los términos de lo que se llama la energía libre.

- La energía libre es positiva. El metal es activo y puede haber corrosión. Es el caso más frecuente entre los metales de uso común (hierro, aluminio, cinc).
- La energía libre es positiva, pero el metal en vez de presentar corrosión, permanece aparentemente intacto; se dice que el metal es pasivo.
- La energía libre es cero o negativa. El metal es indiferente a los agentes agresivos habituales, no siendo posible ninguna reacción de corrosión. Es el caso de los metales nobles.<sup>7</sup>

22

#### **1.1.4 Factores influyen en la corrosión**

Los siguientes factores son los que generalmente se consideran en el proceso de oxidación que conlleva a la corrosión:

**1.1.4.1 Potencial eléctrico de los materiales:** el grado de corrosión depende fundamentalmente de la diferencia de potencial eléctrico existente entre los dos metales en contacto. Cuanto más bajo sea el potencial de un metal, más fácil resultará corroído. Del mismo modo cuando mayor sea la diferencia de potencial entre los dos metales en contacto, mayor será la corrosión galvánica producida entre ambos, siempre en perjuicio del de menor potencial.

**1.1.4.2 Formación de películas y biopelículas:** las películas formadas por microorganismos (Biofilm) pueden tener tendencia a absorber la humedad o retenerla, incrementando la corrosión resultante de la exposición a la atmosférica o los vapores corrosivos.

**1.1.4.3 Temperatura:** es un aspecto que afecta directamente a la corrosión, ya que ésta tiende a aumentar al elevar la temperatura. Esto se debe a que se afecta la solubilidad de la sustancia más común que interviene en la corrosión, el aire. Con respecto a la disminución de temperatura en lugares húmedos, la humedad se condensa y se aloja en la superficie de los materiales acelerando la corrosión. Cuando el porcentaje de humedad en el ambiente es mayor a 80% la reacción aumenta y se acelera la corrosión, en el caso que se encuentre por debajo del 40% la velocidad de la reacción disminuye.

**1.1.4.4 Velocidad:** un aumento en la velocidad del movimiento relativo entre una solución corrosiva y una superficie metálica tiende a acelerar la corrosión, ocasionando que las sustancias oxidantes lleguen a la superficie. Todos los metales pueden ser usados siempre que su velocidad de deterioro sea aceptablemente baja, ya que influye en el costo-beneficio de algún proyecto y el bienestar de la sociedad frente a éste.

**1.1.4.5 Agentes oxidantes:** los agentes oxidantes que aceleran la corrosión de algunos materiales pueden retrasar la corrosión de otras, mediante la formación en sus superficies de óxidos o capas de oxígeno absorbidos que los hacen más resistentes a los ataques químicos. El ambiente influye directamente en el proceso, así es como dependiendo del pH del ambiente se obtiene una corrosión más rápida y certera. Por ejemplo, al exponer un metal a un medio que es corrosivo con contaminantes como es el caso del azufre, la reacción ocurre mucho más rápido que en medios normales. Por lo general, las piezas se ven afectadas por agentes como: el aire y humedad, agua, agua salada, vapor ( $H_2O$  a una

temperatura entre 200 a 400 °C), distintos gases como los CFC, NH<sub>3</sub>, ácidos orgánicos.<sup>8</sup>

## **1.2 INHIBIDORES**

**1.2.1 Inhibidor de corrosión:** Producto elaborado base agua, el cual esta formulado para prevenir la oxidación por periodos cortos de tiempo en almacenes con techo, se puede utilizar como aditivos en fluidos de corte, aditivos para detergentes en el lavado industrial o directamente como inhibidores en el proceso final de lavado.

Ideales para bancos y cuellos de botella de piezas metálicas ferrosas o para inventarios de partes metálicas en proceso. Según sea la concentración de uso (desde 1 en 20 hasta 1 en 5), las condiciones ambientales donde son aplicados, a la zona geográfica, la época del año y la calidad del agua donde son diluidos este producto puede inhibir la oxidación por periodos de 15 a 60 días.

### **1.2.2 ¿Qué es un inhibidor de corrosión?**

Un inhibidor de corrosión es un material que fija o cubre la superficie metálica, proporcionando una película protectora que detiene la reacción corrosiva. Frecuentemente se utilizan recubrimientos temporales para prevenir la corrosión durante el almacenamiento y el embarque y entre operaciones en la industria metal mecánica. Los recubrimientos inhibidores de corrosión más efectivos, en un tiempo, fueron los materiales de base aceite o solvente. En años recientes los productos de base agua han sido desarrollados y están siendo utilizados con gran éxito.

Inhibidor de corrosión sintético soluble en agua para protección bajo techo de metales ferrosos y no ferrosos. Este producto es adecuado para la protección de superficies metálicas entre procesos de producción, como aditivo anticorrosivo de soluciones de enjuague de detergentes y por sus aditivos permite utilizarlo en pruebas hidrostáticas.

Los inhibidores de base agua pueden prevenir efectivamente la corrosión para largos periodos de tiempo (desde semanas hasta meses) bajo condiciones

---

<sup>8</sup> R. L. Camacho Mendoza "Estudio teórico de  $\alpha$ - diiminas sustituidas y su interacción metal-ligante con superficies metálicas de hierro" Tesis de Maestría, UAEH, 2007.



razonables de almacenaje en planta y embarque protegido. Debido a que los productos de base agua trabajan mediante la disminución de la susceptibilidad del metal a la oxidación, y no mediante la eliminación completa del agua y el aire, éstos inhibidores frecuentemente no son tan efectivos como los recubrimientos de base aceite/solvente durante el embarque y el almacenaje al aire libre de las piezas.<sup>9</sup>

**1.2.3 Características de los inhibidores de corrosión:** Se denomina inhibidor de corrosión a una sustancia, que añadida en cantidades muy pequeñas a un metal disminuye o elimina la acción del medio ambiente para corroerlo. Los inhibidores de corrosión actúan formando una película sobre la superficie metálica o bien entregando sus electrones al medio.

La corrosión es el ataque destructivo del metal por una reacción química o electroquímica con su medio ambiente. Frecuentemente se intercambian los términos de corrosión y oxidación. El término oxidación normalmente se aplica a los materiales ferrosos, hierro y acero. El término más utilizado es corrosión, porque incluye también los metales no ferrosos. El manchado metálico es una corrosión ligera que resulta en una decoloración o deslustramiento de la superficie metálica. El manchado no necesita de un medio ambiente húmedo para ocurrir. Puede ser de color blanco y polvoriento, verde, negro o café. Este tipo de corrosión normalmente se encuentra en aluminio, latón y materiales de cobre.

**1.2.3.1 Los inhibidores de corrosión cumplen con las siguientes características principalmente:**

- Revisten química y/o físicamente las superficies metálicas.
- Forman una barrera que aísla la humedad y el oxígeno de la superficie metálica.
- Pueden neutralizar la alcalinidad o acidez de la superficie.

Los inhibidores de corrosión de base agua funcionan modificando las características de las superficies del metal para disminuir su susceptibilidad a la formación de la oxidación y la corrosión. Normalmente se venden concentrados y

---

<sup>9</sup> Jiang X., Zheng Y. and Ke W.: "Corrosion Inhibitor Performances for Carbon Dioxide Corrosion of N80 Steel Under Static and Flowing Conditions" Corrosion, Vol 61. No 4. (2005) 326-334.

requieren ser diluidos con agua, haciéndolos menos costosos que la mayoría de los productos de base aceite.

Los inhibidores de corrosión de base agua generalmente tienen características muy deseables. Las películas químicas formadas son delgadas y son transparentes cuando se secan. Los métodos de aplicación para estos recubrimientos incluyen aspersión, cepillado o inmersión. Muy pocas veces se requiere remover las películas antes de las operaciones subsecuentes, pero si la remoción es necesaria, esto se hace fácilmente con limpiadores suaves de base agua.<sup>10</sup>

### 1.2.3.2 Cálculo de la eficiencia de inhibidores de corrosión.

El cálculo de porcentaje de eficiencia, permite conocer si los inhibidores utilizados, tienen o no un buen desempeño, en la disminución de las velocidades de corrosión, para eso se necesita conocer las corrientes de corrosión del parámetro de comparación o sea el electrolito sin el compuesto con características de inhibición a la corrosión (blanco) y el material evaluado.<sup>11</sup> Ver ecuación [1]

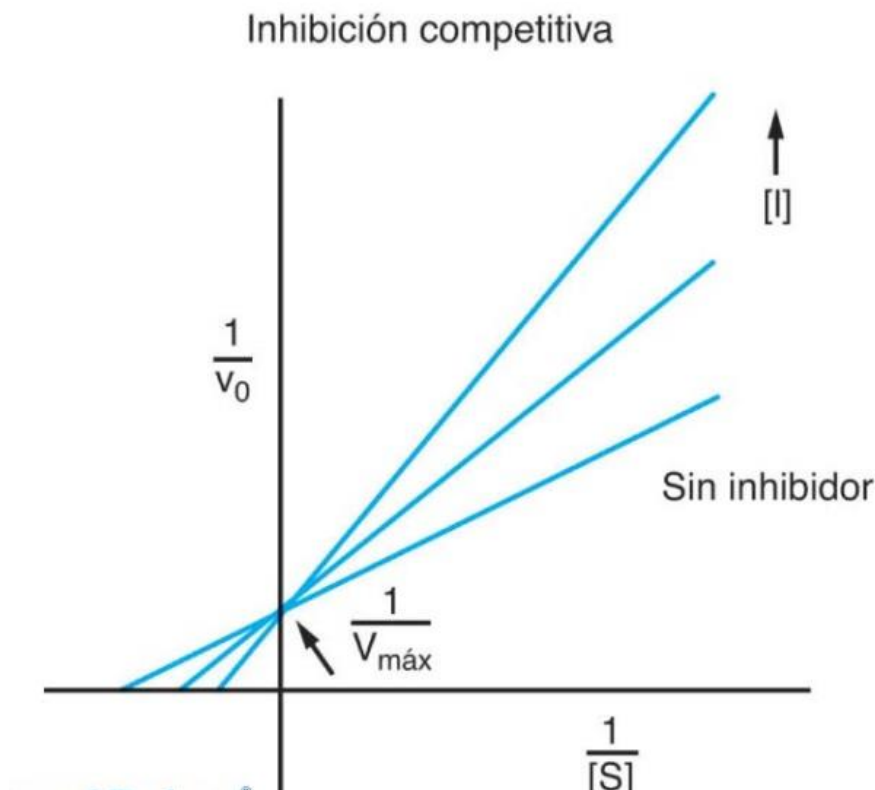
$$\% \text{ de proteccion o eficiencia} = \frac{\text{Vel Corr sin inhibidor} - \text{VelCorr con inhibidor}}{\text{VelCorr sin inhibidor}} \times 100 \quad \text{EC [1]}$$

---

<sup>10</sup> McMahon A.J. and Groves S.: "Corrosion Inhibitor Guidelines. A practical guide to the selection and deployment of corrosion inhibitors in oil and gas production facilities" BP (1995) 23-45.

<sup>11</sup> Seal S., Sapre K., Desai V. and Gopal M.: "Effect of Multiphase Flow on Corrosion of C-Steel in Presence of Inhibitor: A Surface Morphological and Chemical Study". Pergamon. Corrosion Science. Vol 42, (2000) 1623-1634.

**Grafica 1.** Polaridad de un inhibidor.



**Fuente:** manual moderno. /apoyos electrónicos/galeria.cap:10

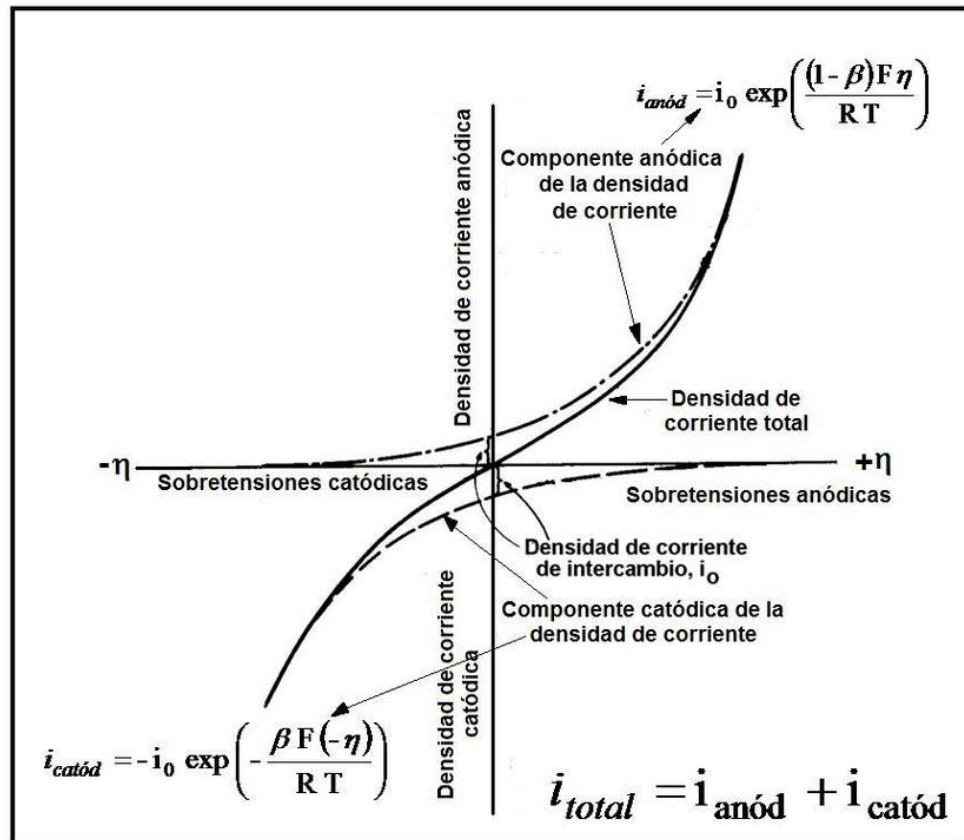
### 1.3 PRUEBAS ELECTROQUIMICAS

#### 1.3.1 Resistencia de polarización lineal (LPR)

Consiste en la aplicación de un potencial pequeño ( $\pm 20\text{mV}$ ), alrededor del voltaje del Electrodo de Referencia o Potencial de Reposo, con el fin de no causar efectos en el sistema electroquímico, el objetivo de este procedimiento es determinar la Resistencia a la Polarización  $R_p$ , la cual es la pendiente de la curva Voltaje Aplicado vs. Corriente en la celda, este valor en sí es uno de los parámetros útiles en el cálculo de la velocidad de corrosión en los sistemas, pero por sí solo, da únicamente información cualitativa de la celda.<sup>12</sup>

<sup>12</sup> M. Stern and A.L. Geary, "Electrochemical polarization. I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves". J. Electrochem. Soc. 1957.

**Grafica 2.** Resistencia de Polarización Lineal (LPR)



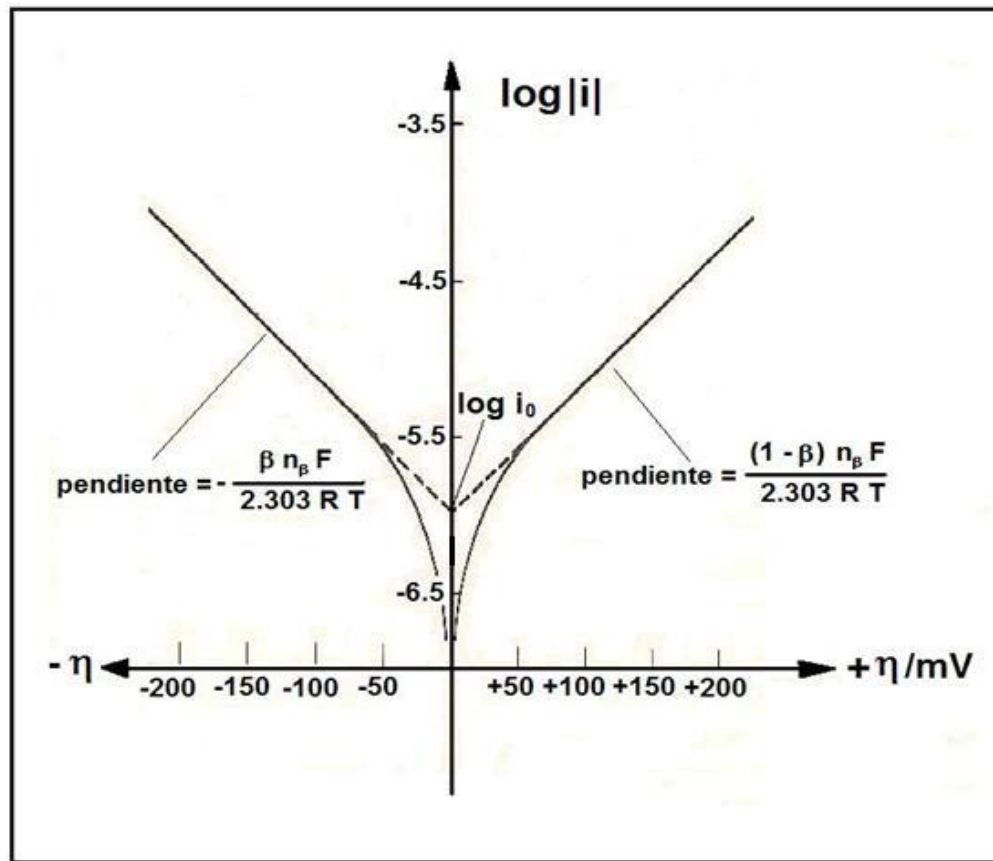
**Fuente:** Estudios Comparativos de Corrosión

### 1.3.2 Curvas de polarización (TAFEL)

Es similar a la prueba LPR, pero aquí la excitación de voltaje se extiende entre  $\pm 200\text{mV}$  con respecto al potencial de reposo, la gráfica se presenta de manera semi logarítmica de la forma  $\log I$  vs  $V$ , el modelo que es usado para los procesos de corrosión asume que las tasas de los procesos anódico y catódico son controladas por la cinética de las reacciones de transferencia electrónica en la superficie del metal, que es el caso general de las reacciones de corrosión.<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Juttner, K.: Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) of corrosion process on inhomogeneous surfaces. Electrochimica Acta, vol. 35, nº 10.

**Grafica 3.** Curva de polarización (TAFEL)



**Fuente:** Electroquímica Inter facial Ed. Cultiva libros.

### 1.3.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)

EIS: espectroscopia de impedancia electroquímica se aplica un estímulo de potencial sinusoidal de baja amplitud, realizándose un barrido discreto de frecuencias. La respuesta de corriente será asimismo sinusoidal, pero desfasada y con amplitud proporcional al módulo de la impedancia<sup>14</sup>

Elemento resistivo Ley de Ohm

$$R = \frac{E}{I} \quad \text{EC [2]}$$

<sup>14</sup> Gamry Instruments, 'Electrochemical Impedance Spectroscopy Primer', [www.gamry.com](http://www.gamry.com)

La relación se cumple para:

- todo  $V$  e  $I$
- el valor de  $R$  es independiente de la frecuencia
- las señales AC de voltaje  $V$  e  $I$  están en fase al pasar por el elemento

Los sistemas reales contienen elementos que siguen un comportamiento más complejo, se utiliza como elemento general de circuito a la impedancia. La impedancia al igual que la resistencia representa la propiedad del circuito de resistir el pasaje de corriente. Al contrario de la resistencia no están limitadas por las propiedades expuestas en el párrafo anterior.<sup>15</sup>

EIS es medida normalmente utilizando excitaciones de potencial de baja amplitud (aprox. 10 mA). Bajo esta perturbación es de esperar que el sistema se comporte como pseudo – lineal.

Diagramas de Impedancia: Se entiende por respuesta de frecuencia de un circuito eléctrico al espectro formado por la variación de la impedancia en un barrido de frecuencia (10-12). Las representaciones más usuales de frecuencia de un sistema lineal son:

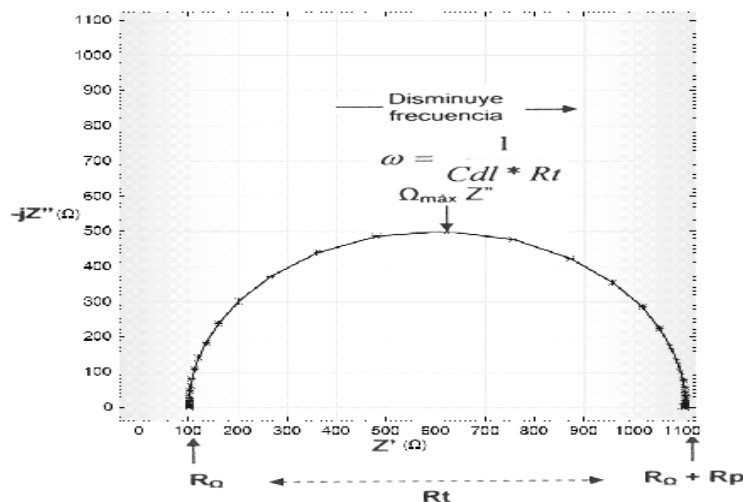
- **Diagrama de Nyquist.**
- **Diagrama de Bode.**

**El diagrama de Nyquist** para un proceso de corrosión simple, también es conocido como diagrama de impedancia en plano complejo y son curvas semicirculares o funciones de varios semicírculos. En este caso se grafica el componente imaginario de la impedancia ( $Z''$ ) contra el componente real de la impedancia ( $Z'$ ) para cada frecuencia a la que se aplicó la señal sinusoidal de voltaje, dando como resultado una semicircunferencia sobre el eje de la resistencia.

---

<sup>15</sup> Macdonald, J.R.; Johnson, W.B.: Fundamentals of impedance spectroscopy. Barsoukov, E.; Macdonald, J.R. (editores). Impedance Spectroscopy. Theory, experiment and applications, 2ª Edición. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2005.

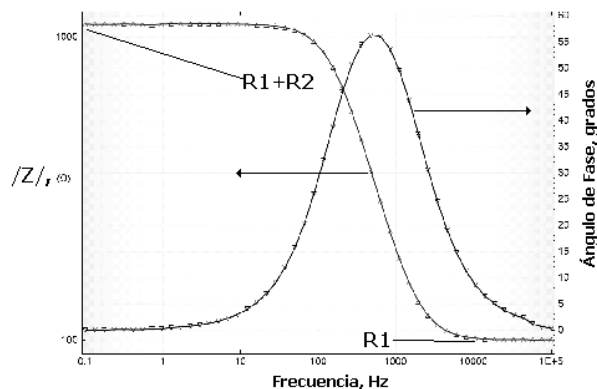
**Grafica 4.** Diagrama Nyquist para un sistema electroquímico simple.



**Fuente:** Métodos Experimentales en la Ciencia de la Corrosión Impedancia Electroquímica

**El diagrama de Bode** representa la variación de la impedancia real contra la frecuencia graficada en coordenadas log-log. La presencia de resistencias en el circuito provoca mesetas horizontales; mientras que los capacitores presentan pendientes negativas y los inductores de pendientes positivas.<sup>16</sup>

**Grafica 5.** Diagrama de Bode para un sistema electroquímico simple.



**Fuente:** Métodos Experimentales en la Ciencia de la Corrosión Impedancia Electroquímica

<sup>16</sup> Mansfeld, F.; Shih, H.; Tsai, C.H.: Análisis of EIS data por common corrosion proceses. Scully, J.R.; Silverman, D.C.; Kendig, M.W. (editores). Electrochemical impedance. Análisis and interpretation. Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 1993.

## 1.4 ESTADO DEL ARTE

Actualmente los desarrollos de inhibidores de corrosión de metales apuntan a inhibidores a base de extractos de plantas en medios ácidos y salinos, estos han demostrado ser la mejor alternativa para el desarrollo de inhibidores por ser amigables al medio ambiente y mostrar buenos resultados a la hora de probar su eficiencia.

Los estudios más recientes de inhibidores entre los que se encuentran:

M. Sc. Bibiana Sandianes-Vega, bibiana@cidci.cu, Dr. Jorge Uruchurtu-Chavarín, juch25@uaem.mx, Dr. Osmar Calderón-Secada, Dr. Osmar Calderón-Sánchez “ESTUDIO DE UN INHIBIDOR DE CORROSIÓN EN MEDIO ÁCIDO” El tratamiento ácido a pozos de petróleo es uno de los procesos tecnológicos más corrosivos para instalaciones metálicas, pues involucra ácidos concentrados, elevada temperatura y tiempo prolongado, entre otros, siendo imprescindible el uso de métodos de protección contra la corrosión, donde el más adecuado y difundido en la práctica mundial es la adición de inhibidores de corrosión a la receta ácida. Sin embargo, gran parte de estos productos disminuye su acción protectora en el sistema mencionado, por lo que son escasos aquellos que satisfacen las exigencias para poder ser utilizados en estos tratamientos, lo cual además eleva su precio en el mercado internacional. Por lo que el objetivo de este trabajo fue estudiar un inhibidor comercial para tratamientos ácidos a pozos de petróleo, que posee reconocido prestigio y probada eficiencia, cuyos resultados sustentaran el desarrollo de productos nacionales de similar eficiencia y menor costo. Se emplearon técnicas de análisis para identificar elementos de la composición y estructura de los componentes, previamente separados en fracciones, así como métodos electroquímicos para el estudio de su comportamiento inhibitor, demostrando estos últimos que el principio activo radica en el residuo, el cual se comporta similar al producto original, con una conducta típica de inhibidores mixtos de adsorción, recomendados para medio ácido.<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup> M. Sc. Bibiana Sandianes-Vega, bibiana@cidci.cu, Dr. Jorge Uruchurtu-ChavarínII, juch25@uaem.mx, Dr. Osmar Calderón-SecadaIII, Dr. Osmar Calderón-SánchezIV I Centro de Investigación y Desarrollo del Comercio Interior (CID-CI), La Habana, Cuba, IIUniversidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Cuernavaca, Morelos, México, IIIEmpresa Gestión del Conocimiento y la Tecnología (GECYT), La Habana, Cuba, IVFacultad de Química de la Universidad de La Habana, Cuba. 2011



Reyes Cruz Víctor Esteban, "EVALUACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS COMO INHIBIDORES DE CORROSIÓN EN MEDIO ÁCIDO" Los inhibidores de corrosión son materiales que producen disminución en la pérdida de metal debida a ataques de corrosión. Estos inhibidores disminuyen las velocidades de reacción de oxidación o reducción del sistema de corrosión, o bien, en ambas reacciones. Así mismo, pueden formar una barrera protectora contra los agentes corrosivos sobre el metal, ya sea adsorbiéndose sobre la superficie libre del acero, o bien combinándose con los productos de corrosión iniciales. Actualmente el campo de desarrollo de inhibidores de corrosión se encuentra en una etapa de evaluación de diferentes compuestos heterocíclicos nitrogenados, con fuertes características de inhibición de la corrosión, lo cuales prometen ser excelente materia prima para el desarrollo de inhibidores de corrosión eficientes en ambientes amargos. En este trabajo se presentan los resultados preliminares en la evaluación de tres compuestos orgánicos nitrogenados que fueron desarrollados en el IMP y un compuesto comercial, como inhibidores de corrosión en un medio ácido tipo NACE TM0177. Se aplicó la Técnica de Polarización Lineal para determinación de velocidades de corrosión tanto en el medio sin aditivos como en presencia de los diferentes compuestos a evaluar. Se variaron parámetros como la Concentración del inhibidor y el tiempo de inmersión del electrodo.<sup>18</sup>

Pech-Canul Máximo A, González Dzul Carlos E "Inhibición de la corrosión de acero, zinc y cobre en soluciones de HCl usando jugo de sábila" Se realizaron mediciones de impedancia electroquímica y curvas de polarización global para 3 metales (acero, cobre y zinc) después de 2h de inmersión en soluciones de HCl 1M con y sin un aditivo extraído del gel de la hoja de sábila. Basados en los valores de resistencia de polarización obtenidos con impedancia y en los valores de densidad de corriente de corrosión obtenidos por extrapolación de TAFEL, se concluyó que el aditivo actúa como un buen inhibidor para acero y para zinc, pero no para el cobre. Las constantes de TAFEL para los 3 metales en las soluciones de prueba fueron consistentes con los reportados en la literatura. En cuanto al modo de acción del aditivo, se observó que para acero y zinc actúa como un inhibidor mixto, mientras que para cobre actúa como un inhibidor anódico.<sup>19</sup>

---

<sup>18</sup> Reyes Cruz Víctor Esteban Evaluación de compuestos orgánicos como inhibidores de corrosión en medio ácido. XX Congreso Nacional de la SMEQ; Puente de Ixtla, Morelos del 22 al 27 de Mayo del 2005. (ISBN 9709911015) O. Alvarado Cortés, M. A. Veloz Rodríguez, R. Martínez Palou, V. E Reyes Cruz. 2005

<sup>19</sup> Pech-Canul Máximo A.\* , González Dzul Carlos E. Departamento de Física Aplicada, Cinvestav-Mérida, Km 6 ant. Carr. a Progreso, Ap 73 Cordemex, CP 97310, Mérida, Yuc., México.2007

## METODOLOGIA

### 2.1 UBICACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto se desarrolló en los laboratorios del instituto para la investigación e innovación en ciencia y tecnología de los materiales INCITEMA de la UPTC donde se encuentran los equipos requeridos para el desarrollo del proyecto relacionado a continuación:

#### **Computadores con software requeridos**

- GAMRY FRAMEWORK.
- GAMRY ECHAM ANALYST.

#### **Equipos:**

- Pulidora Dace Technologies NANO 200 DT.
- Figura 1. Microscopio óptico Carl Zeiss Axiotech.
- Máquina universal de ensayos Microtest.
- Microdurómetro digital HSV-1000.
- Espectrómetro Q8 Magellan.
- Se tapa el vaso con una tapa de teflón macizo la cual sostiene los electrodos de trabajo.
- Se utiliza un vaso de precipitado de vidrio de 200 ml que se encuentra sobre una estufa para tener una temperatura de 70 y 80 °C respectivamente.
- Se ubican y conecta los tres electrodos de trabajo: electrodo de trabajo (A39), contra electrodo (platino) y electrodo de referencia (plata-cloruro de plata).
- Se conecta con cables de continuidad eléctrica al computador y se hacen las pruebas con el software GAMRY FRAMEWORK.

### 2.2 DESCRICION DE LA METODOLOGIA

Se describirá cada uno de los pasos realizados para cumplir con el desarrollo del proyecto.

**2.2.1 Valores de las variables:** Para calcular la eficiencia de los tres inhibidores, se pretende evaluar cada variable independiente y la interacción entre ellas se

estudia el efecto de la variación de la dosificación, la temperatura y concentración de oxígeno, en un acero API N 80, manteniéndolas en un ambiente acuoso para ello se van utilizar los valores escritos en la tabla 1, logrando estas condiciones en una celda para pruebas electroquímicas.

**TABLA 1.** Variables, niveles.

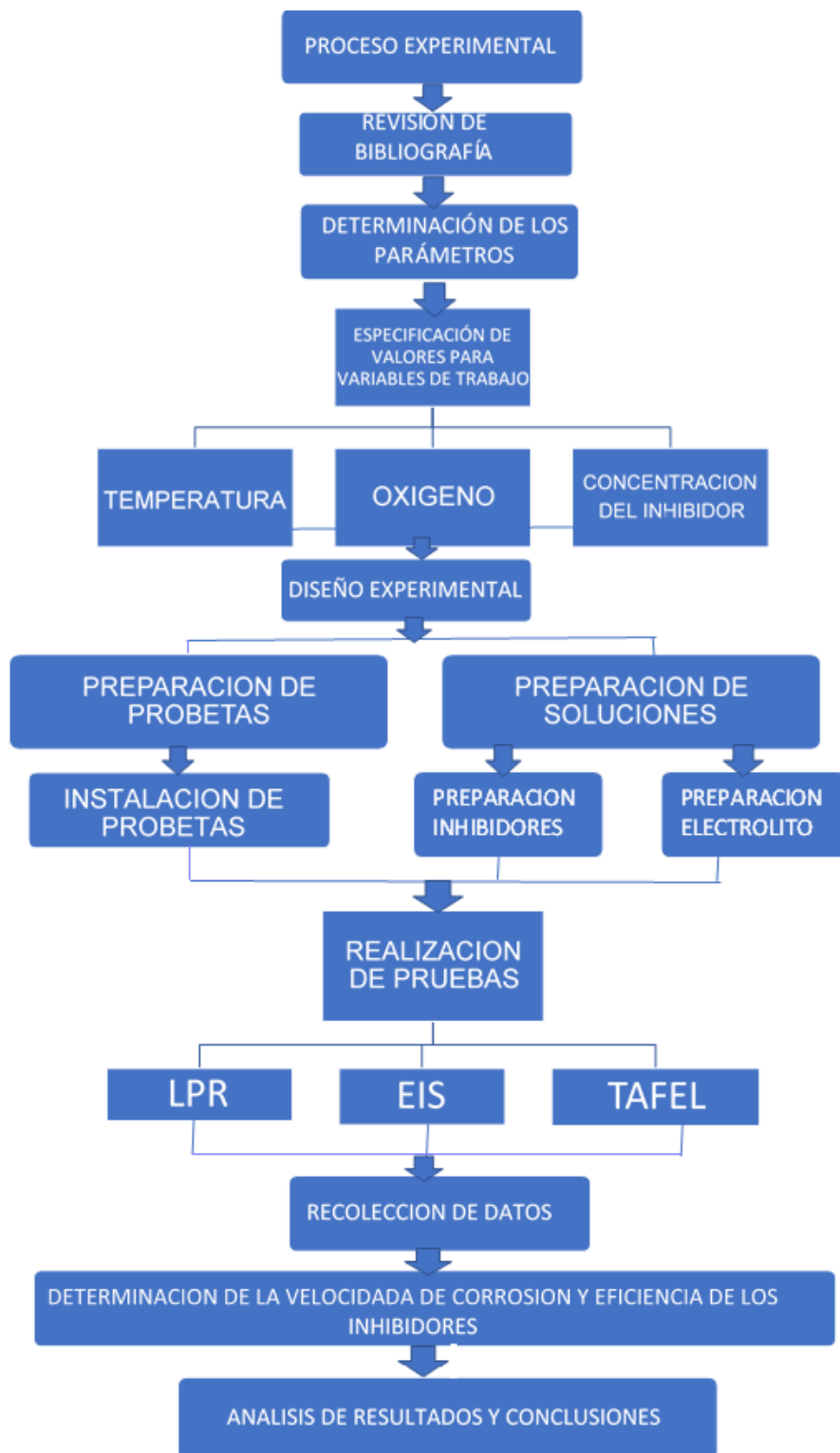
Variables		Niveles			Pruebas
INHIBIDORES	ELECTROLITO	TEMPERATURA °C	OXIGENO ppm	DOSIFICACIONES ppm	108
LA-3518-C	FLUIDO COMERCIAL 1(CCS-12)	70	0	0	
VX-12615	FLUIDO COMERCIAL 2(TRS-N2)	80	5	10	
97-VD-129	FLUIDO COMERCIAL 3(DGR-12)	-	-	30	

**Fuente:** autor.

### 2.2.2 Diseño metodológico

En la figura 3 diseño metodológico se describe las etapas necesarias para la obtención gráfica y de datos, de donde se extrae la información para el análisis final de la velocidad de corrosión y de los efectos de las variables anteriormente mencionadas en la tabla 1, y el efecto de estas sobre este valor.

**Figura 4.** Diseño metodológico



**Fuente:** Autor

## 2.3 CARACTERIZACION DEL MATERIAL

Para el desarrollo del proyecto, se utilizaron piezas mecanizadas de una sección de tubería identificada como acero API N80. Para garantizar que el material utilizado en las pruebas correspondía con acero API N80, se realizó la caracterización metalográfica, de resistencia mecánica, microdureza y composición química.

**2.3.1 Caracterización metalográfica.** La caracterización microestructural se realizó siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM E 3<sup>20</sup>. Se utilizó una pulidora DACE TECHNOLOGIES NANO 200 DT, con velocidad de rotación variable (figura 5) y se realizó el pulido del material desde grano 80 hasta 1200. Luego del desbaste y pulido con lija se realizó la preparación de la probeta con paños y adición de alúmina hasta obtener una superficie con acabado espejular y libre de líneas de pulido.

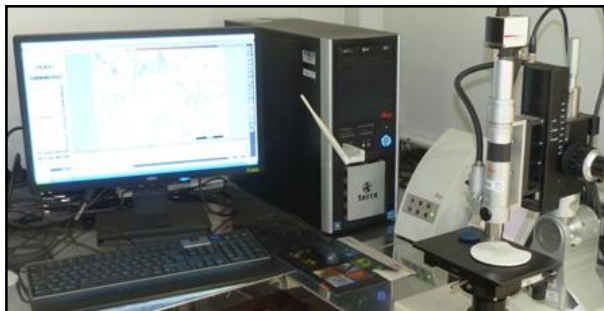
**Figura 5.** Pulidora Dace Technologies NANO 200 DT.



**Fuente:** Autor.

Luego del pulido la probeta se observó en microscopio CARL ZEISS (figura 6) con objetivo de 100X para analizar las inclusiones presentes, según ASTM E 45<sup>21</sup>.

**Figura 6.** Microscopio óptico Carl Zeiss AxioTech.



**Fuente:** Autor.

<sup>20</sup> ASTM E 3. Standard guide for preparation of metallographic specimens.

<sup>21</sup> ASTM E 45. Standard test methods for determining the inclusion content of steel.

Al finalizar el análisis de inclusiones, la probeta fue atacada con *nital* (alcohol + ácido nítrico) al 3% durante 3 segundos, para ser analizada en microscopio óptico CARL ZEISS AXIOTECH con objetivos de 200X y 1000X para caracterizar la microestructura.

**2.3.2. Determinación de resistencia mecánica.** La resistencia mecánica se determinó siguiendo recomendaciones de ASTM E 8<sup>22</sup>, usando una máquina universal de ensayos MICROTEST (figura 7). Donde se mecanizaron probetas planas con sección transversal conocida (figura 8).

**Figura 7.** Máquina universal de ensayos Microtest.



**Fuente:** Autor.

**Figura 8.** Probetas para máquina de tracción.



**Fuente:** Autor.

---

<sup>22</sup> ASTM E 8. Standard test methods for tension testing of metallic materials.

**2.3.3. Análisis de micro dureza.** La determinación de micro dureza se realizó de acuerdo con ASTM E 384<sup>23</sup>. Se utilizó un micro durómetro digital MICROHARDNESS TESTER HSV-1000 (figura 9). Se realizaron 5 indentaciones con carga de 9,8 N y separación de 1 mm entre ellas.

**Figura 9.** Micro durómetro digital HSV-1000.



**Fuente:** Autor.

**2.3.4. Determinación de composición química.** La composición química se determinó mediante espectrometría de emisión óptica con fuente de chispa, se siguieron lineamientos de ASTM E 415<sup>24</sup>. Se utilizó un espectrómetro Q8 MAGELLAN BRUKER QUANTRON presentado en la figura 10.

**Figura 10.** Espectrómetro Q8 Magellan.



**Fuente:** Autor.

---

<sup>23</sup> ASTM E 384. Standard test method for microindentation hardness of materials.

<sup>24</sup> ASTM E 415. Standar test method for optical emission vacuum spectrometric analysis of carbon and low-alloy steel.

## 2.4 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Las siguientes fases fueron desarrolladas durante la realización de este proyecto, como número de pruebas, actividades y tiempo en el que se llevaron a cabo.

**2.4.1 Preparación de probetas:** se maquinaron 10 probetas de acero API N-80 simulando el material de las tuberías de transporte de crudo lo que dará los electrodos de trabajo para la realización de 108 pruebas estáticas se llevó el siguiente procedimiento:

1. Seleccionar el material para electrodo de trabajo.
2. Mecanizar en un torno las probetas de acero API N-80 de un tubo de transporte de crudo al punto de obtener la forma cilíndrica requerida para las pruebas
3. Pulir las probetas con diferente papel esmeril de grado, (100, 200, 500, 600, 1000, y 1500.), obtener una superficie espejo donde la presencia de rayas no se convierta en generadores de corrosión. Lo cual garantiza una superficie limpia y homogénea con un grado de preparación superficial el área para electrodo de trabajo.
4. Cubrir con cinta aislante el resto de la probeta para evitar interferencias. (figura 11).

**Figura 11.** probeta pruebas estaticas



**Fuente:** Autor.

**2.4.2 Control de variables.** Se verifican variables como material, electrolito, concentración de inhibidor, dosificaciones de oxígeno y temperatura para controlar el sistema.

**2.4.2.1 Material.** Se utiliza el acero API N - 80 que es un material que simula las características de las tuberías de transporte de hidrocarburos. Se determina la



composición del material para asegurar el tipo de acero requerido para las pruebas.

**Tabla 2.** Composición del material.

Códigos estándar	Modelos de tubos de acero	COMPOSICIÓN QUÍMICA							
		C	Si	MN	P	S	CR	V	AL
API	N80	0.34~0.38	0.20~0.35	1.45~1.70	≤0.020	≤0.015	≤0.15	0.11~0.16	≤0.020

**Fuente:** autor

**2.4.2.2 Electrolito.** Se utilizó tres diferentes fluidos comerciales [1(CCS-12), 2(TRS-N2), 3(DGR-12)] para cada prueba específicamente en una cantidad de 170 ml por prueba. (figura 12)




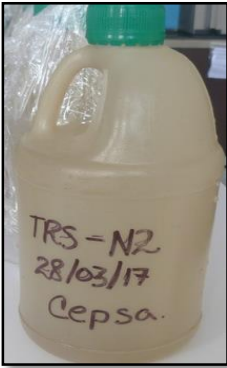
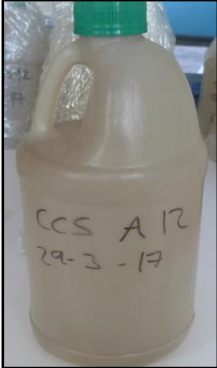
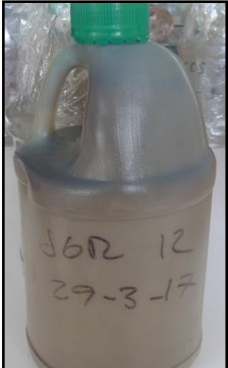
**Figura 12.** Cantidad de electrolito por prueba.



**Fuente:** Autor.

**2.4.2.3 Concentración del inhibidor.** Se consideran concentraciones de 0ppm, 10ppm y 30ppm en cada uno de los tres inhibidores utilizados (LA-3518-C, VX-12615, 97-VD-129), para tener un amplio campo de comparación del comportamiento a prueba. (Figura 14)

**Tabla 3.** Muestras analizadas.

MUESTRAS DE ANALISIS			
INHIBIDORES EVALUADOS			
	97VD129	VX 12615	LA35180
FLUIDOS DE PRODUCCION			
	TRS-N2	CCS A 12	DGR 12

**Fuente:** autor

**2.4.2.4 Dosificación de oxígeno:** se consideran dosificaciones de 0ppm y 5ppm de oxígeno en cada respectiva prueba, para simular un ambiente más corrosivo, teniendo en cuenta un caudal de (1 CHF= 1ppm)

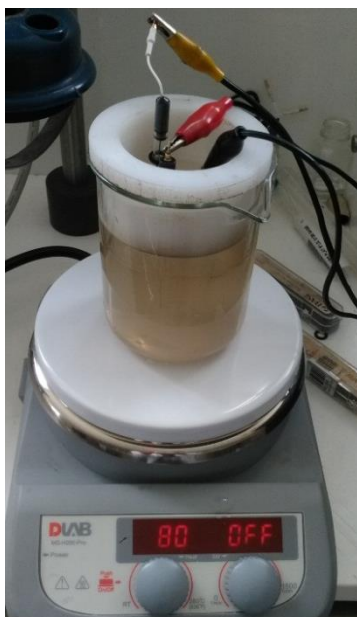
**2.4.2.5 Temperatura.** Se tiene en cuenta el efecto de la temperatura en el sistema por lo que no solo se debe manejar la temperatura ambiente cuando las condiciones son diferentes. Se usan 70°C y 80°C, con ayuda de una plancha de calentamiento y termómetro que garantizan el control de esta variable. (Figura 13)

**2.4.3. Montaje de la celda electroquímica.** Se comienza determinando el área de la probeta, agregando 170ml del electrolito a un vaso de precipitado de 200ml, se tapa el vaso de precipitado con una tapa de teflón macizo la cual sostiene los

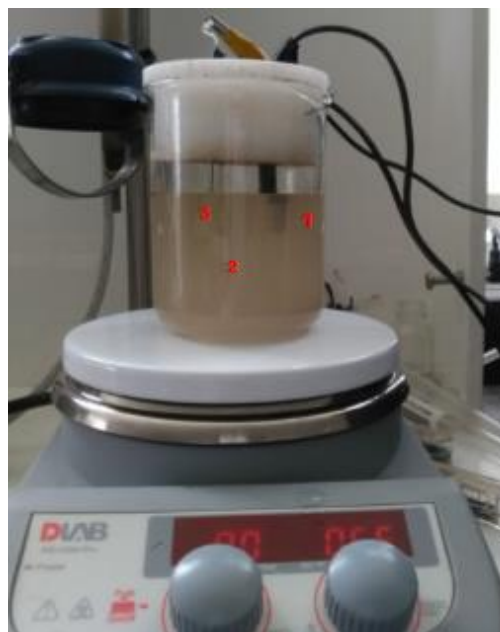
electrodos de trabajo y permite sumergirlos en el electrolito. Se coloca sobre una estufa para tener una temperatura de 70°C y 80°C respectivamente, se ubican los tres electrodos de trabajo (figura 15) y se conecta con cables de continuidad eléctrica al computador y se hacen las pruebas con el software GAMRY FRAMWORK.

**Tabla 4.** montaje de celda electroquímica.

**Figura 13.** Pruebas estaticas a 80°C



**Figura 14.** Electroodos de trabajo



**Figura 15.** Montaje de celda electroquimica



**Fuente:** autor

- Electrodo de trabajo (N-80) (figura 14 (1))
- Contra electrodo (platino) (figura 14 (2))
- Electrodo de referencia (plata -cloruro de plata) (figura 14 (3))

**2.4.4. Pruebas electroquímicas.** se trazan curvas de polarización con una velocidad de barrido de 1mV/s, en intervalo de potenciales, con un tiempo de inmersión de 12 minutos, previo a cada experimento. Se realiza un análisis cuantitativo a partir de los resultados de resistencia a la polarización lineal (LPR), potencial de circuito abierto (POT), espectroscopia de impedancia (EIS) y TAFEL, para obtener los parámetros de corrosión a dos diferentes temperaturas, tres electrolitos, dos dosificaciones de oxígeno y tres inhibidores.

Se pretende obtener la eficiencia de los tres inhibidores de corrosión, esta eficiencia de protección se evalúa al medir las velocidades de corrosión bajo un mismo método de prueba con y sin inhibidor (conocida como en blanco o referencia).

El método usual de reportar la eficiencia de corrosión es en porcentaje de protección, definido como:

$$\% \text{ de proteccion o Eficiencia} = \frac{VelCorrsin\ inhibidor - VelCorrcon\ inhibidor}{VelCorrsin\ inhibidor} \times 100 \quad EC[3]$$

Donde la velocidad de corrosion puede expresarse en unidades de velocidad de penetracion como milesimas de pulgada por año, MPY como en este caso; o en unidades internacionales (SI) mm/año o en unidades de cinetica electrquimica en A/m<sup>2</sup>.

**2.4.5. Análisis de los resultados.** Con la informacion obtenida se grafica la velocidada de corrosion en funcion de las variables independientes (concentracion, temperatura y dosificaciones) para determinar la corrosion del material, se analizo el efecto de cada variable, de igual forma se establecera la influencia simultanea de los factores estudiados, en relacion con la velocidad de corrosion del acero API N-80.

### 3. RESULTADOS Y ANALISIS

#### 3.1 PREPARACION DE ELECTROLITO (FLUIDO).

$$\frac{6120 \text{ ml por cada fluido}}{36 \text{ pruebas por fluido}} = 170 \text{ ml por prueba}$$

#### 3.2 PREPARACION DE INHIBIDOR

Se redujo la concentración del inhibidor puro, en una relación de 10 % de inhibidor puro y 90 % de agua destilada, y se calculó la cantidad en ppm.

##### Para una dosis de 30ppm

$$1\text{ppm} = 1\text{mg/L} = 10^{-6} \text{ L}$$

$$\text{Inhibidor puro}(100\%) = \frac{30\text{ppm}}{1000 \text{ mL}} \times 170\text{mL} = 5,1\mu\text{L}$$

$$\text{Dilución } 10\% = 5,1\mu\text{L} \times 10 = 51 \mu\text{L}$$

51  $\mu\text{L}$  en 170 ml por 30ppm de dosificación.

##### Para una dosis de 10ppm

$$1\text{ppm} = 1\text{mg/L} = 10^{-6} \text{ L}$$

$$\text{Inhibidor puro}(100\%) = \frac{10\text{ppm}}{1000 \text{ mL}} \times 170\text{mL} = 1,7\mu\text{L}$$

$$\text{Dilución } 10\% = 1,7\mu\text{L} \times 10 = 17 \mu\text{L}$$

17  $\mu\text{L}$  en 170 ml por 10ppm de dosificación.

### 3.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Para identificar la composición química del material que se quiere evaluar, se desarrollaron los siguientes análisis:

**3.3.1 Composición química.** En el espectrómetro de emisión de chispa se analiza la composición de material, los valores del resultado obtenidos son comparados con los determinados por la norma API SPC 5CT, Specification for Casing and Tubing, para el acero N-80. En la tabla 5, se muestra el resultado del análisis por espectrómetro de chispa.

**Tabla 5.** Análisis de composición por espectrómetro de chispa

Composición Química			
Elemento	%	Elemento	%
C	0,322	P	0,00803
Co	<0,01	S	0,00795
Cr	0,0358	Si	0,205
Cu	0,00686	Sn	0,00414
Fe	98,1	Ti	<0,005
Mn	1,18	V	<0,0050

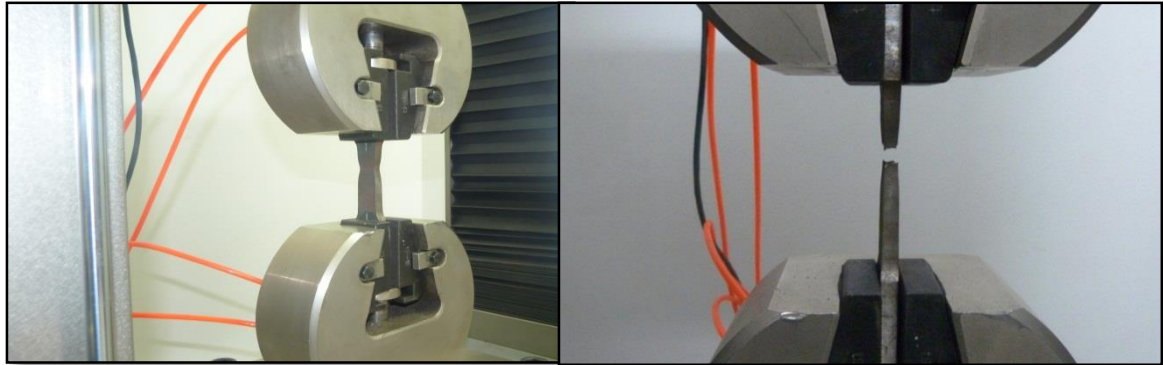
**Fuente:** autor

De acuerdo con la especificación de la norma, se comprueba que el material analizado cumple con las especificaciones para el tipo de acero analizado.

**3.3.2 Ensayo de tracción.** Según la norma API SPC 5CT, Specification for Casing and Tubing, los valores para la tracción toma valores de superiores a 80.000 psi.

A continuación se relacionan las evidencias de la realización del ensayo de tracción siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E 08. La figura 16, muestra el montaje y el momento en que la probeta falla a una carga aproximadamente de 105.485 KN.

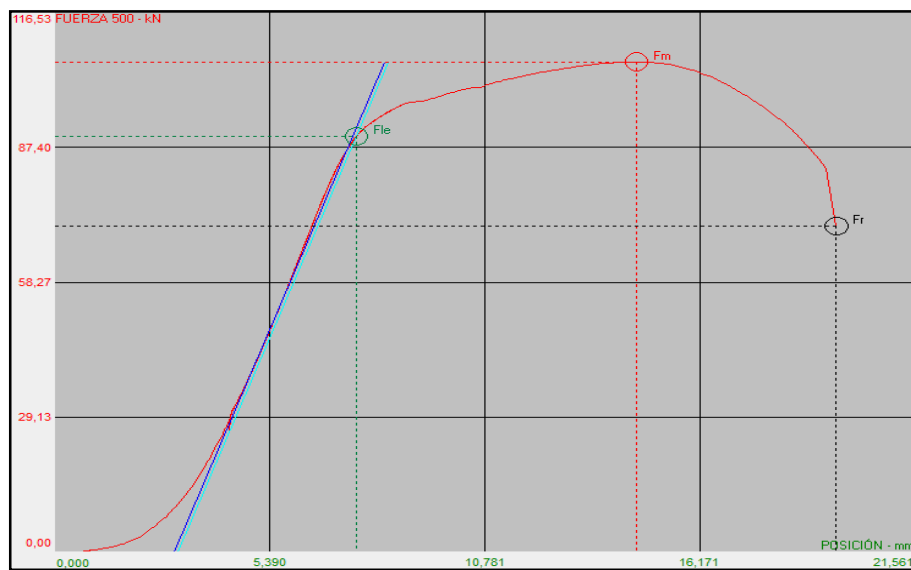
**Figura 16.** Ensayo de tracción probetas N-80.



**Fuente:** Autor.

La figura 17, muestra los valores obtenidos en el ensayo de tracción, en una curva de esfuerzo vs deformación, donde se toma el esfuerzo y se divide por el área para así hallar la resistencia que puede soportar el material.

**Figura 17.** Esfuerzo vs Deformación de probeta acero API N-80.



**Fuente:** Autor.

Después de realizada la curva, se desarrollan los siguientes cálculos para obtener el valor de resistencia a la tracción en base a la ecuación (4):

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad Ec (4)$$

$\sigma$ : Resistencia a la traccion

$P$ : Valor de la carga (lb)

$A$ : Area de la probeta ( $in^2$ )

Los datos de las dimensiones expuestas dan como resultado un area expuesta al ensayo de traccion( $A$ ) y una carga ( $P$ ). Los valores obtendinos son reemplazados en la ecuacion (4), dando como resultado en la ecuacion (4b) el valor de resistencia a la traccion para el acero API N-80.

$$A = 6.9mm \times 20.8mm = 143.52 * mm^2 = 0.222in^2$$

$$P = 105845 N$$

$$1kg = 9,8N = 2,2Lb$$

$$P = \frac{105485 N \times 2,2Lb}{9,8N} = 23680,30 Lb \quad Ec (4a)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{23680,30 Lb}{0.222 in^2} = 106668,04 \frac{Lb}{in^2} \quad Ec (4b)$$

Se determinó que el acero cumple con las especificaciones de la resistencia a la tracción, ya que según la norma API SPC 5, la resistencia de un acero API N-80 es mayor o igual a 80000 psi, comparada con el resultado del ensayo que dio 106668,04 psi.

**3.3.3 Micro durómetro.** Según la norma ASTM E 384, Se registran los valores de dureza como un promedio 241.1 Vickers, este valor se compara con la norma API SPC 5 y se determina que está dentro de las especificaciones requeridas por esta. Los valores obtenidos se relacionan en la “tabla 6”, muestra los valores obtenidos en la prueba.

**Tabla 6.** Prueba de dureza acero API N-80.

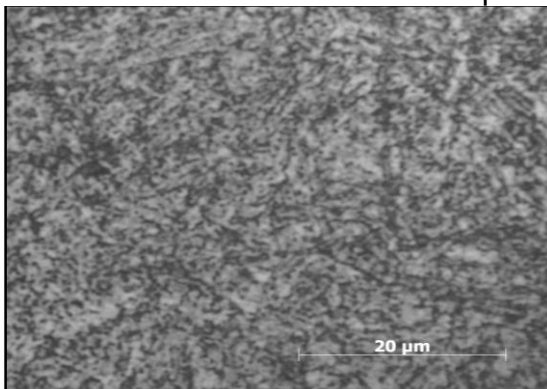
Prueba	1	2	3	4	5
Valor obtenido(HV)	243.3	242.3	240.2	238.6	239,4

**Fuente:** autor

**3.3.4 Microestructura.** Se realiza una comparación de la estructura identificada por el microscopio metalográfico la cual se encuentra en la (figura 18), y la estructura que se muestra en la norma API SPC 5CT, denominada Specification for Casing and Tubing, se verifica que la estructura es totalmente bainitica característica de este tipo de acero, con el tipo de tratamiento térmico que recibe.



**Figura 18.** Microestructura de un acero N-80. Microscopio metalográfico, 500x.



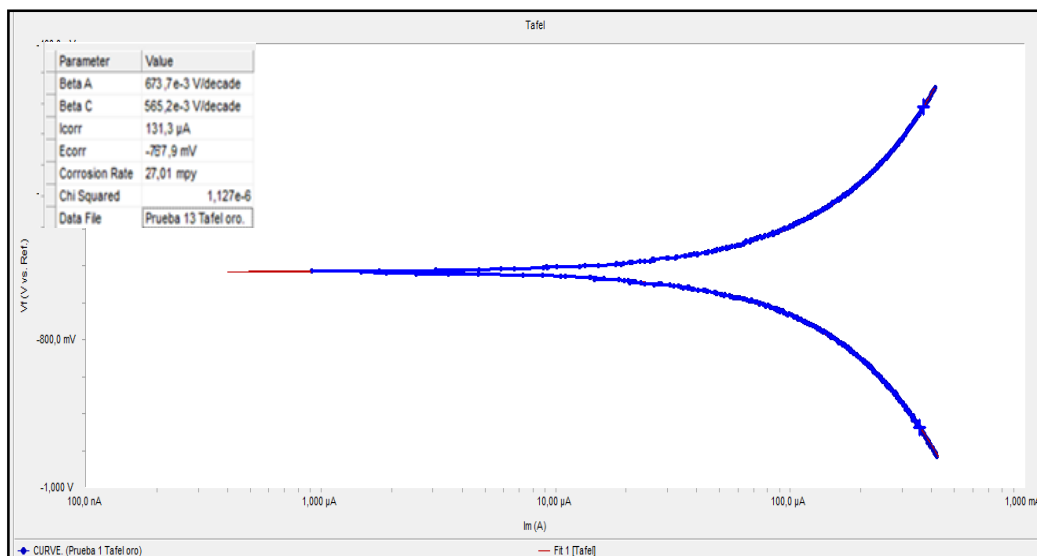
**Fuente:** Autor.

### 3.4 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE INHIBICIÓN.

A continuación se relaciona y analizan los resultados obtenidos en cada una de las técnicas electroquímicas empleadas en la evaluación del inhibidor:

**3.4.1 Construcción de curvas de polarización tafel.** En el software GAMRY FRAMEWORK, se introducen datos de entrada como densidad del material, área expuesta de la probeta, se vincula el programa por medio de conexiones y se construye la gráfica en base a los impulsos de la señal transmitida por el montaje como se observa en la figura 19.

**Figura 19.** Construcción y análisis de curvas de polarización Tafel.



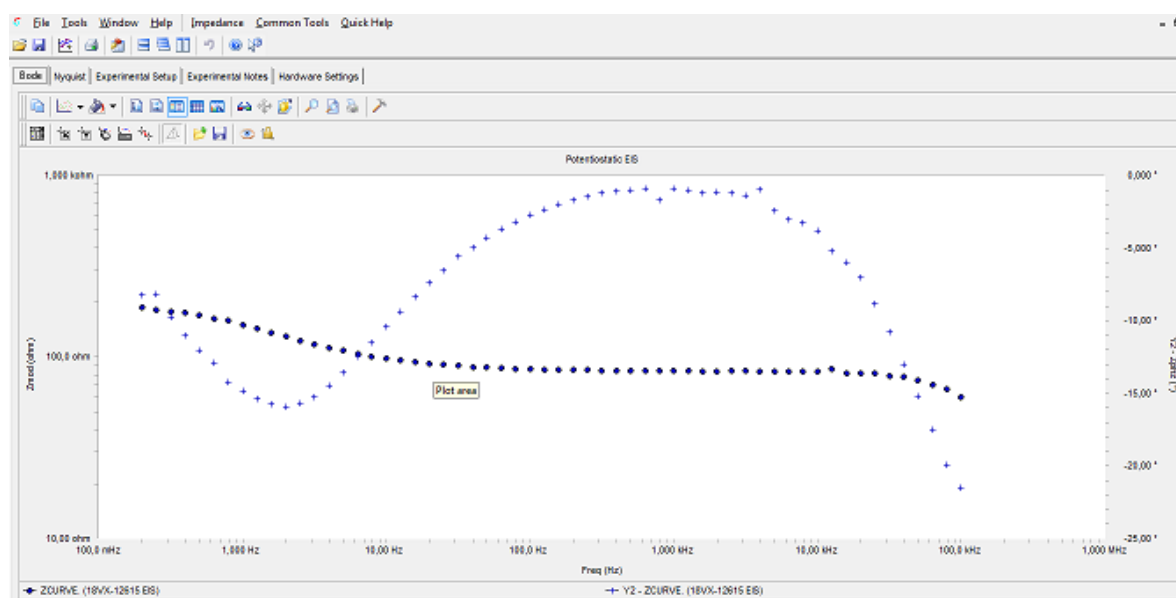
**Fuente:** Autor.

### 3.4.2 Espectroscopia de impedancia electroquímica.

Es una técnica de caracterización ampliamente utilizada para investigar los mecanismos de las reacciones electroquímicas. Este método es ampliamente usado en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una señal alterna (CA) que es aplicada a un electrodo de trabajo o metal en corrosión, determinando la respuesta en corriente a diferentes frecuencias.

Los espectros de impedancia obtenidos se analizan mediante circuitos eléctricos, compuestos por componentes como resistencia (R), capacitancia (C), e inductancias (L), combinados. Estos circuitos llamados “circuitos equivalentes” permiten identificar el comportamiento electroquímico metal/electrolito.

**Figura 20.** Construcción y análisis de curvas de polarización EIS.



**Fuente:** Autor.

A continuación se establecen los valores de impedancia para cada una de las pruebas, en este caso se escoge las condiciones más agresivas para y con las cuales se determina la eficiencia de inhibición para cada inhibidor y su comportamiento.

Luego de realizar pruebas electroquímicas, se determina la impedancia para cada uno de los fluidos industriales, tomando como referencia una muestra sin presencia de inhibidor (blanco), para obtener la eficiencia de inhibición según lo establece la norma ASTM G 170, ecuación 1:

$$Eficiencia\ de\ Inhibición\ (\%) = \left(1 - \frac{Impedancia\ Blanco}{Impedancia\ Inhibida}\right) \times 100 \quad (1)$$

Ejemplo para determinación de la eficiencia de inhibición teniendo en cuenta la impedancia obtenida en cada una de las pruebas:

$$Eficiencia\ de\ Inhibición\ (\%) = \left(1 - \frac{108,0}{351,9}\right) \times 100 = 69,31\ \%$$

Como se evidencia en cada una de los diagramas de Bode, que para cada electrolito el valor de impedancia para los fluidos que no contienen ninguna dosificación de inhibidor, presenta una fuerte disminución debido a que no se forma ningún tipo de película sobre la superficie de las probetas metálicas.

### 3.5 RESULTADOS DE VELOCIDAD DE CORROSIÓN.

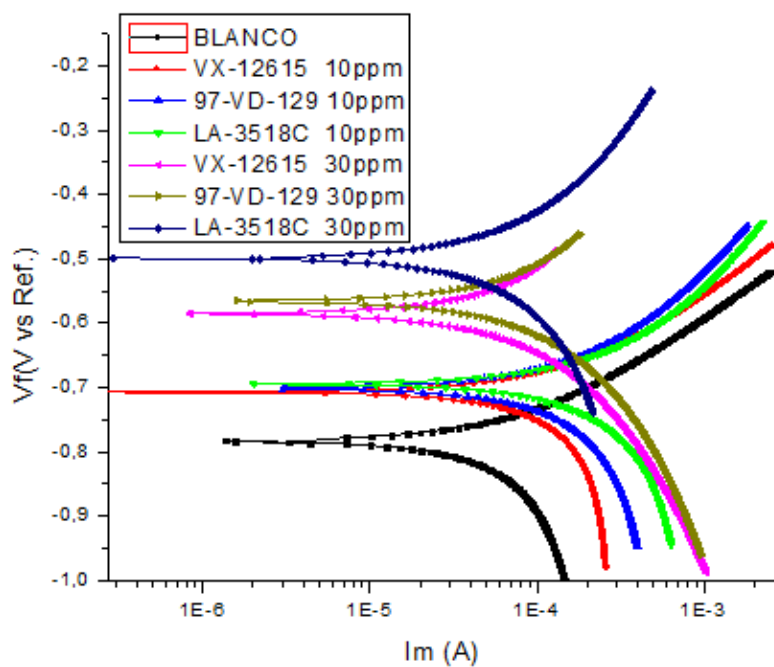
Después de realizadas las pruebas se obtuvieron los resultados que se muestran en las siguientes tablas. La velocidad de corrosión en pruebas estáticas EIS y TAFEL.

**Tabla 7.** Velocidades de corrosión y eficiencia a 70°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm en el fluido CCS-12.

T°	INHIBIDOR	MUESTRA DE FLUIDO	DOSIFICACION (ppm)	corrosion rate (mpy)	RP (ohms)	I corr (µa)	% E CR =
70	BLANCO	CCS-12	0	24,84	244,6	157,6	0
	LA-3518-C		10	12,79	321,9	150,8	48,51
	VX-12615		10	16,95	257,4	167,1	42,63
	97-VD-129		10	13,87	202,1	291,4	46,53
	LA-3518-C		30	8,21	341,4	142,2	66,94
	VX-12615		30	12,25	301	121,2	58,65
	97-VD-129		30	9,64	288,1	149,7	62,83

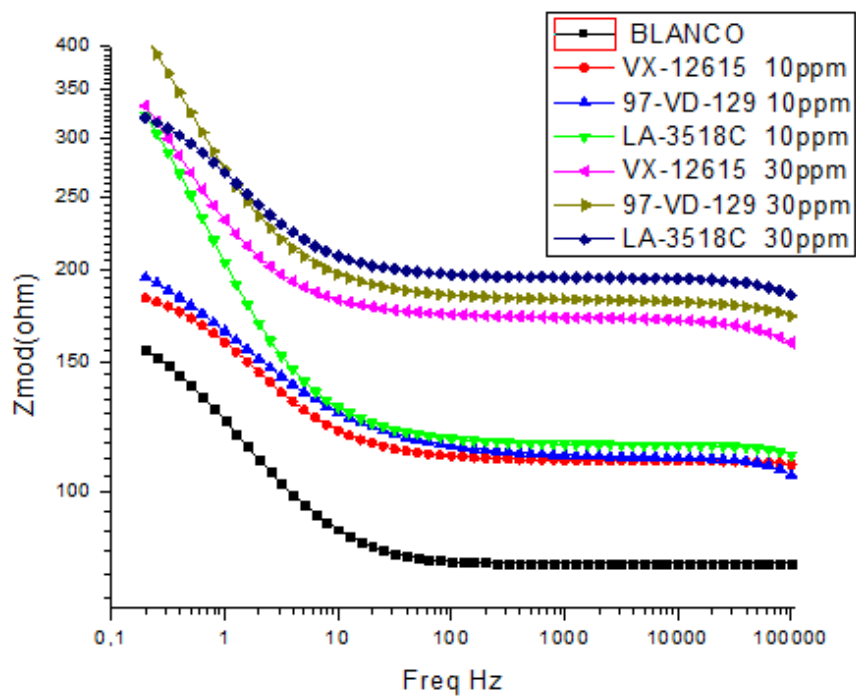
**Fuente:** Autor.

**Figura 21.** Curvas TAFEL a 70°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



**Fuente:** Autor.

**Figura 22.** Curvas EIS a 70°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



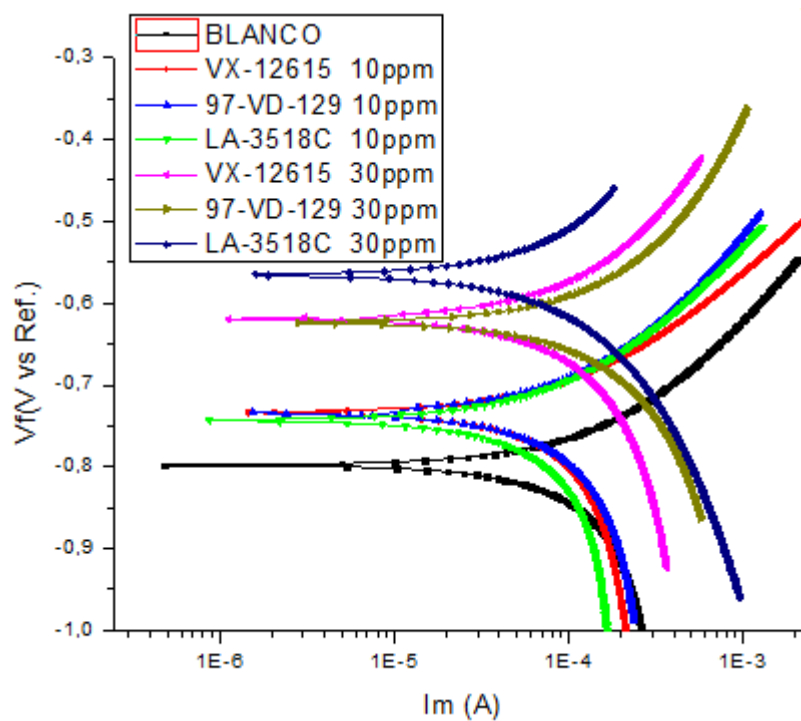
**Fuente:** Autor.

**Tabla 8.** Velocidades de corrosión y eficiencia a 80°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm en el fluido CCS-12.

T°	INHIBIDOR	MUESTRA DE FLUIDO	DOSIFICACION (ppm)	corrosion rate (mpy)	RP (ohms)	I corr (μa)	% E CR =
80	BLANCO	CCS-12	0	27,01	252,4	149,2	0
	LA-3518-C		10	14,81	602,7	62,31	45,16
	VX-12615		10	18,92	281,3	142,6	37,1
	97-VD-129		10	15,95	466,4	85,43	44,36
	LA-3518-C		30	10,84	716	52,01	59,86
	VX-12615		30	13,86	418,1	68,44	53,92
	97-VD-129		30	11,58	4165	3,83	58,66

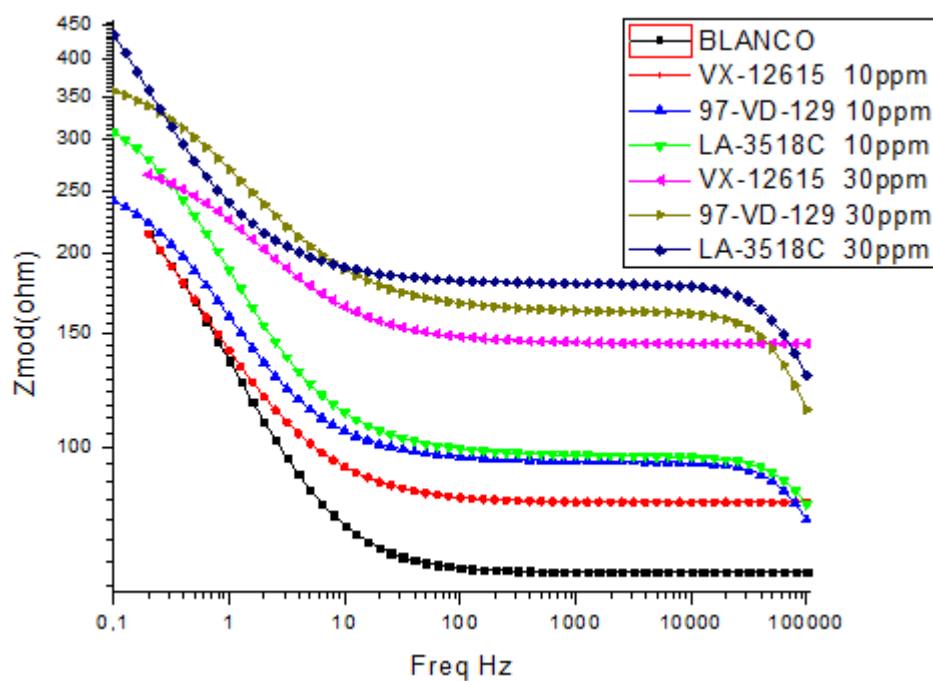
Fuente: Autor.

**Figura 23.** Curvas TAFEL a 80°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



Fuente: Autor.

**Figura 24.** Curvas EIS a 80°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



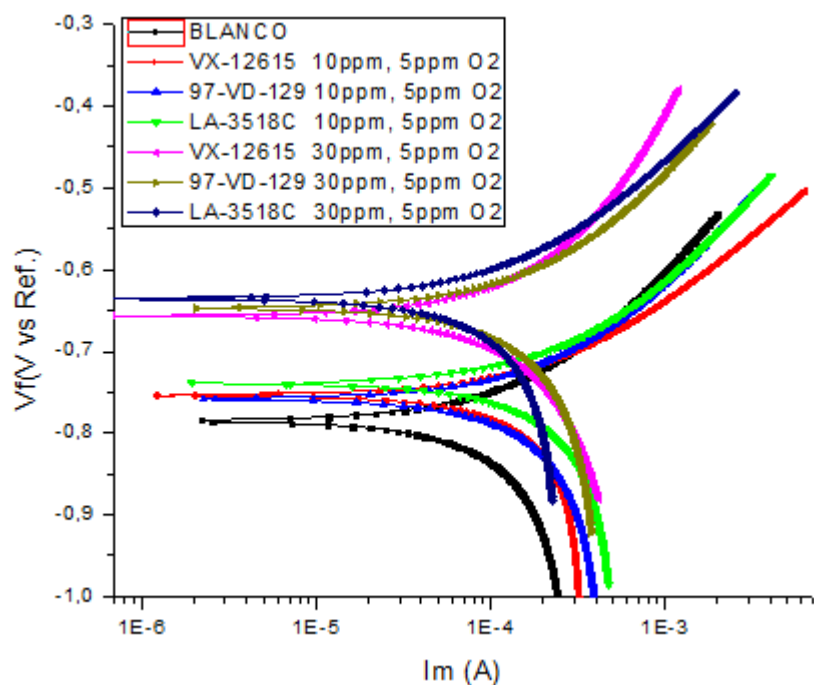
**Fuente:** Autor.

**Tabla 9.** Velocidades de corrosión y eficiencia a 70°C, 5ppm de O<sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm en el fluido CCS-12.

T°	INHIBIDOR	MUESTRA DE FLUIDO	DOSIFICACION (ppm)	DOSIFICACION O <sub>2</sub> (ppm)	corrosion rate (mpy)	RP (ohms)	I corr (µa)	% E CR =
70	BLANCO	CCS-12	0	5	31,37	174,1	302,5	0
	LA-3518-C		10	5	17,58	234,9	255,6	43,95
	VX-12615		10	5	21,07	260,5	177,8	34,4
	97-VD-129		10	5	16,84	299,8	168,4	41,99
	LA-3518-C		30	5	13,64	316,4	185,7	56,51
	VX-12615		30	5	15,84	356,7	139,3	50,68
	97-VD-129		30	5	13,81	449,5	128,7	52,4

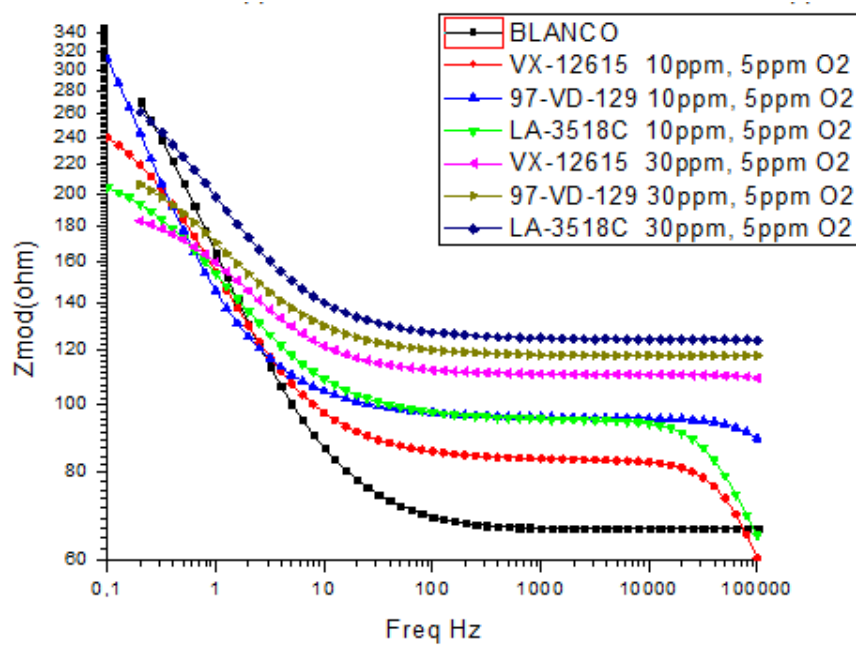
**Fuente:** Autor.

**Figura 25.** Curvas TAFEL a 70°C, 5ppm de O<sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



**Fuente:** Autor.

**Figura 26.** Curvas EIS a 70°C, 5ppm de O<sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



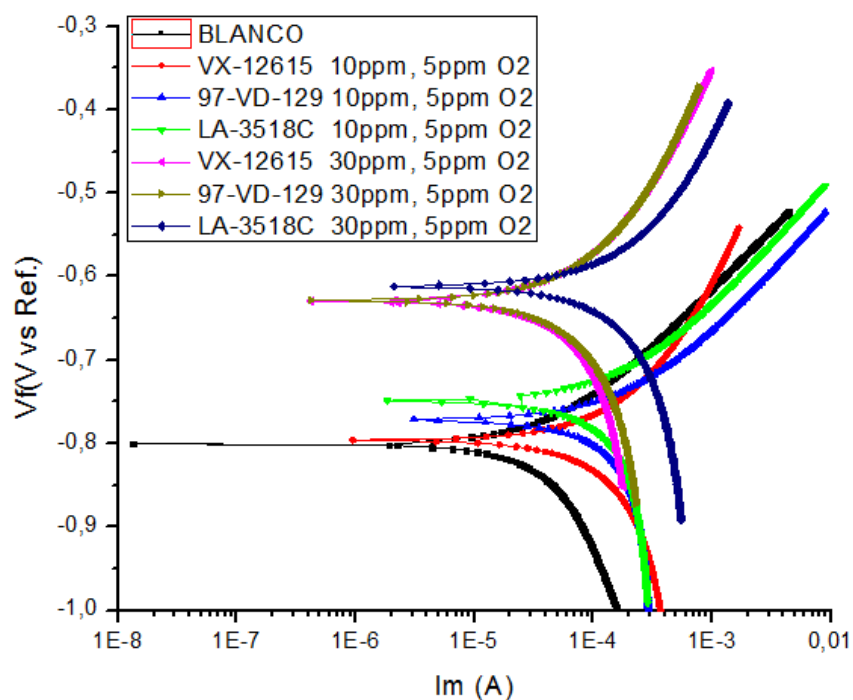
**Fuente:** Autor.

**Tabla 10.** Velocidades de corrosión y eficiencia a 80°C, 5ppm de O<sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm en el fluido CCS-12.

T°	INHIBIDOR	MUESTRA DE FLUIDO	DOSIFICACION (ppm)	DOSIFICACION O <sub>2</sub> (ppm)	corrosion rate (mpy)	RP (ohms)	I corr (μa)	% E CR =
80	BLANCO	CCS-12	0	5	30,55	271,1	204,2	0
	LA-3518-C		10	5	18,22	351	151	40,36
	VX-12615		10	5	22,17	319	144,5	31,88
	97-VD-129		10	5	19,08	497,7	96,34	39
	LA-3518-C		30	5	14,78	270,9	122,6	51,62
	VX-12615		30	5	17,37	419,4	94,9	46,63
	97-VD-129		30	5	15,91	516,8	21,42	49,13

**Fuente:** Autor.

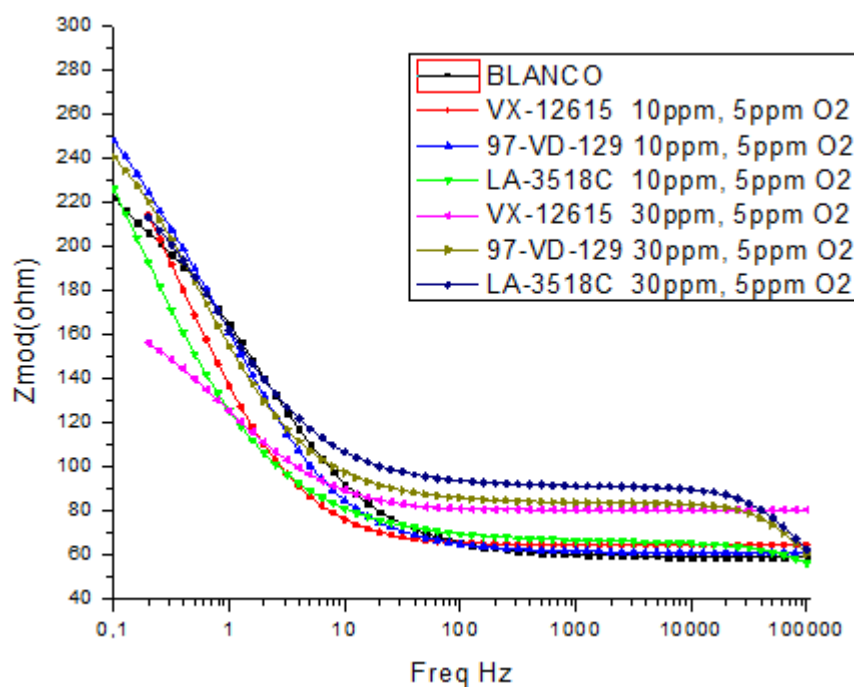
**Figura 27.** Curvas TAFEL a 80°C, 5ppm y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



**Fuente:** Autor.



**Figura 28.** Curvas EIS a 80°C, 5ppm de O2 y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



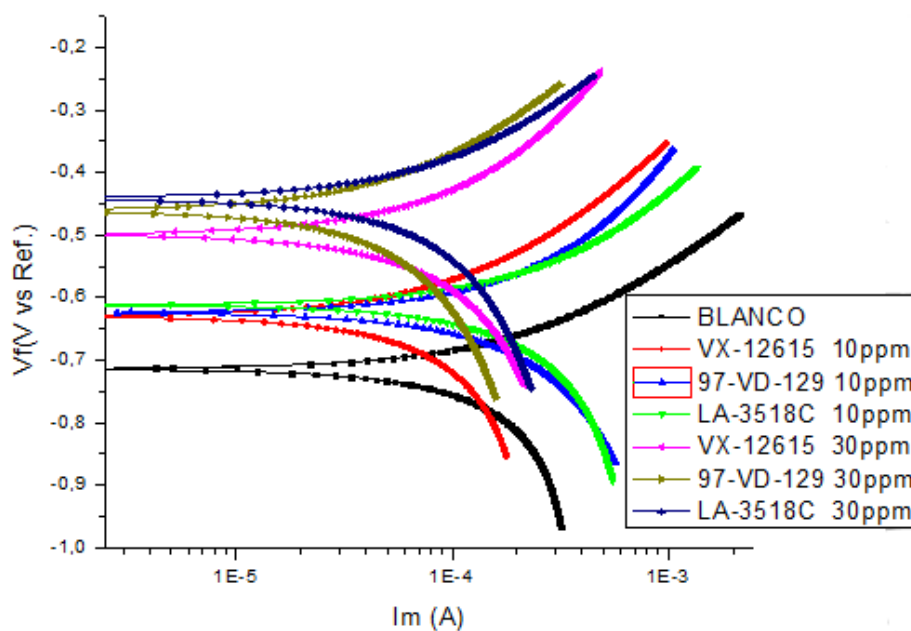
**Fuente:** Autor.

**Tabla 11.** Velocidades de corrosión y eficiencia a 70°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm en el fluido TRS-N2.

T°	INHIBIDOR	MUESTRA DE FLUIDO	DOSIFICACION (ppm)	corrosion rate (mpy)	RP (ohms)	I corr (μa)	% E CR =
70	BLANCO	TRS-N2	0	22,87	538,5	102,7	0
	LA-3518-C		10	8,62	638,6	86,25	62,3
	VX-12615		10	13,67	383,6	121,4	51,67
	97-VD-129		10	12,08	343,4	194,1	55,76
	LA-3518-C		30	5,96	745,5	75,3	73,93
	VX-12615		30	10,64	526,1	86,82	62,38
	97-VD-129		30	8,95	560,7	110,4	67,22

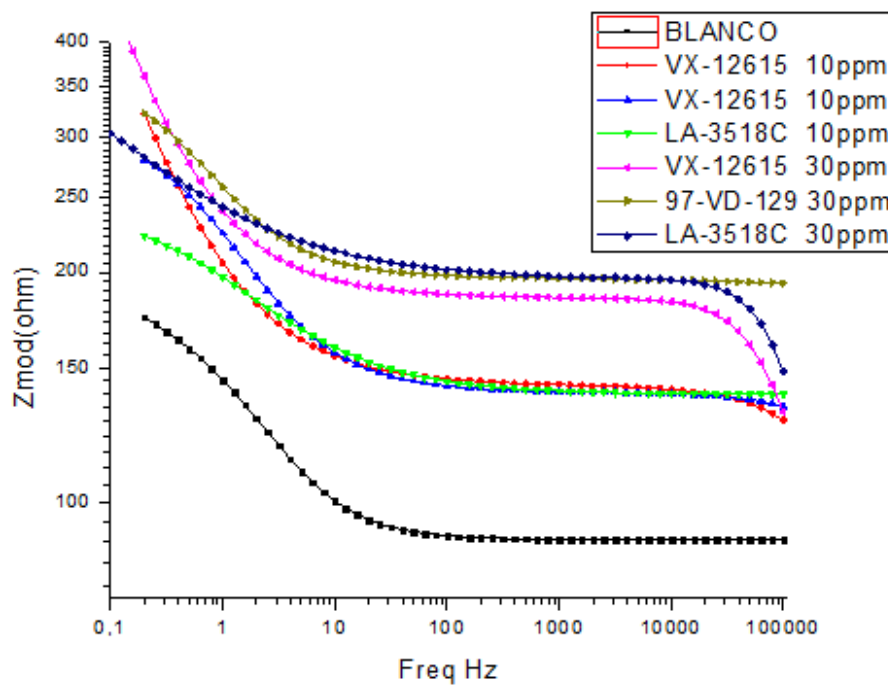
**Fuente:** Autor.

**Figura 29.** Curvas TAFEL a 70°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



**Fuente:** Autor.

**Figura 30.** Curvas EIS a 70°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



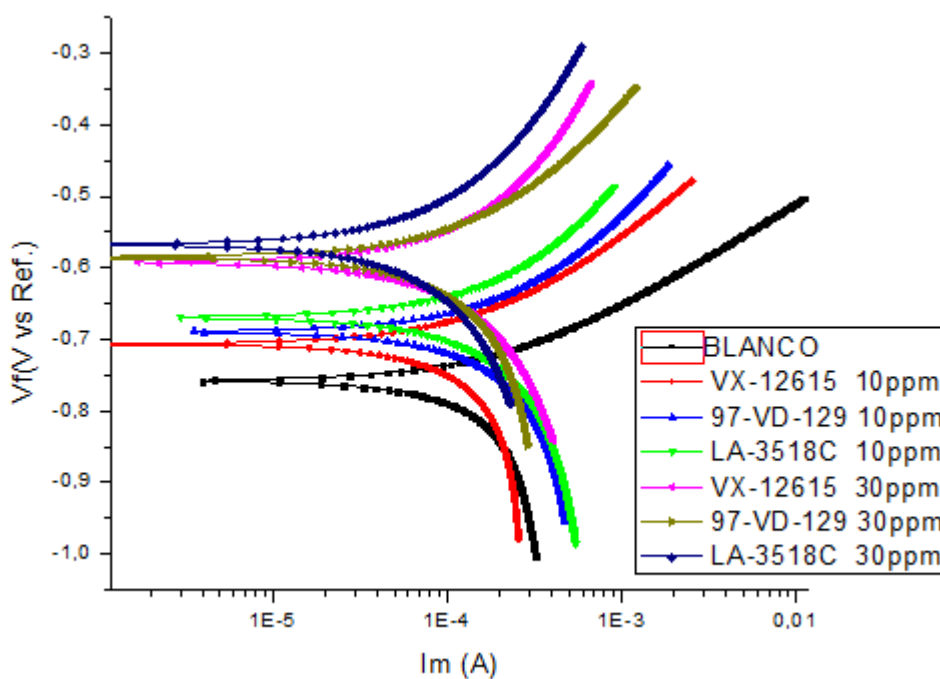
**Fuente:** Autor.

**Tabla 12.** Velocidades de corrosión y eficiencia a 80°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm en el fluido TRS-N2.

T°	INHIBIDOR	MUESTRA DE FLUIDO	DOSIFICACION (ppm)	corrosion rate (mpy)	RP (ohms)	I corr (μa)	% E CR =
80	BLANCO	TRS-N2	0	24,78	759,8	71,93	0
	LA-3518-C		10	10,65	789,4	50,55	57,02
	VX-12615		10	15,61	744,5	78,52	49,82
	97-VD-129		10	13,88	542,7	117,4	53,91
	LA-3518-C		30	7,25	793,6	45,61	70,74
	VX-12615		30	12,44	854,7	71,59	60,01
	97-VD-129		30	11,14	594,8	95,08	63,12

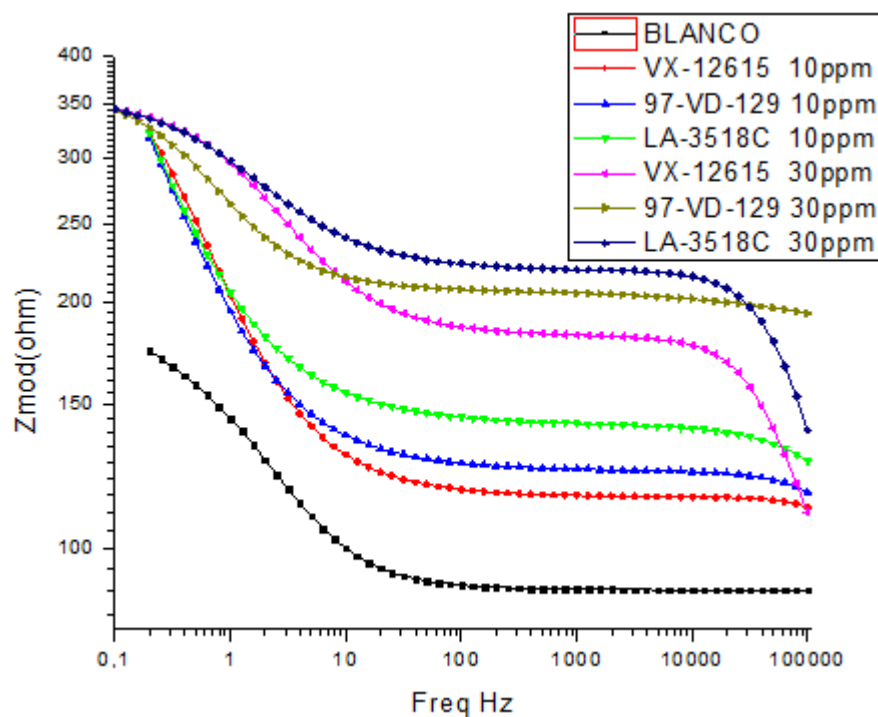
**Fuente:** Autor.

**Figura 31.** Curvas TAFEL a 80°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



**Fuente:** Autor.

**Figura 32.** Curvas EIS a 80°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



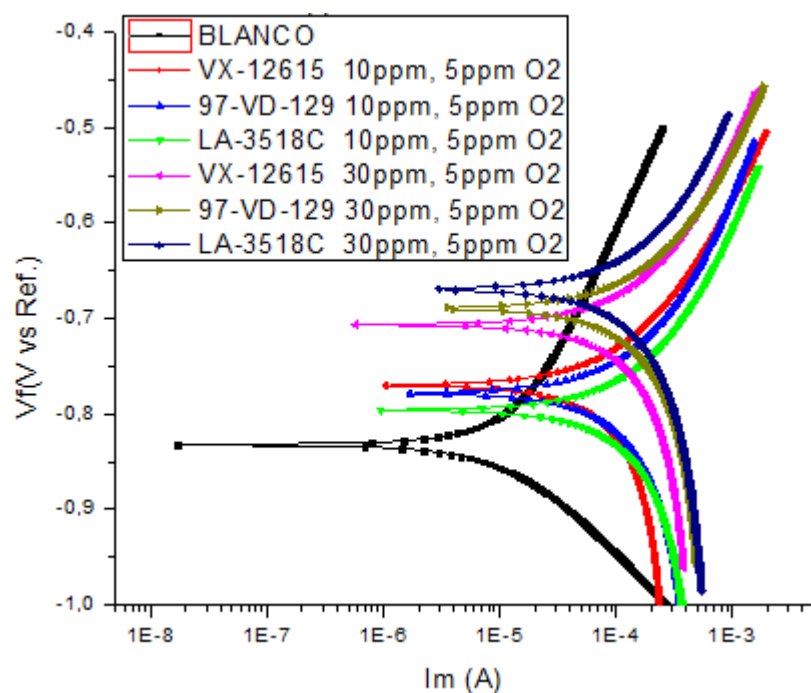
**Fuente:** Autor.

**Tabla 13.** Velocidades de corrosión y eficiencia a 70°C, 5ppm de O<sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm en el fluido TRS-N<sub>2</sub>.

T°	INHIBIDOR	MUESTRA DE FLUIDO	DOSIFICACION (ppm)	DOSIFICACION O <sub>2</sub> (ppm)	corrosion rate (mpy)	RP (ohms)	I corr (µa)	% E CR =
70	BLANCO	TRS-N <sub>2</sub>	0	5	28,98	368,4	147,7	0
	LA-3518-C		10	5	13,34	442,8	134,4	53,96
	VX-12615		10	5	17,27	389	168,9	48,96
	97-VD-129		10	5	14,97	350,3	154,5	51,74
	LA-3518-C		30	5	8,75	446,2	99,77	69,8
	VX-12615		30	5	14,32	434	110,5	57,68
	97-VD-129		30	5	12,17	447,7	130,3	60,76

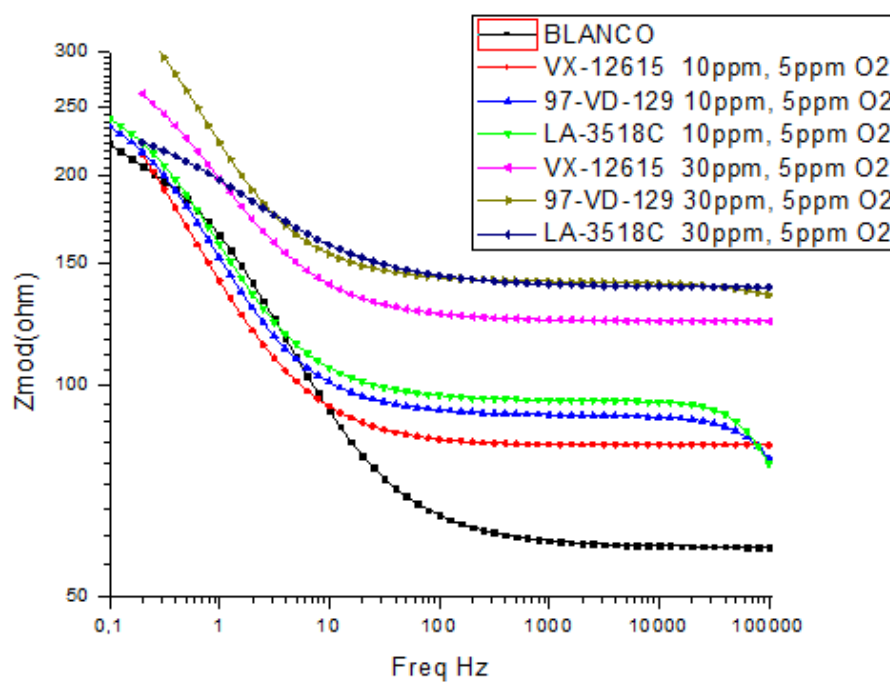
**Fuente:** Autor.

**Figura 33.** Curvas TAFEL a 70°C, 5ppm de O2 y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



**Fuente:** Autor.

**Figura 34.** Curvas EIS a 70°C, 5ppm de O2 y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



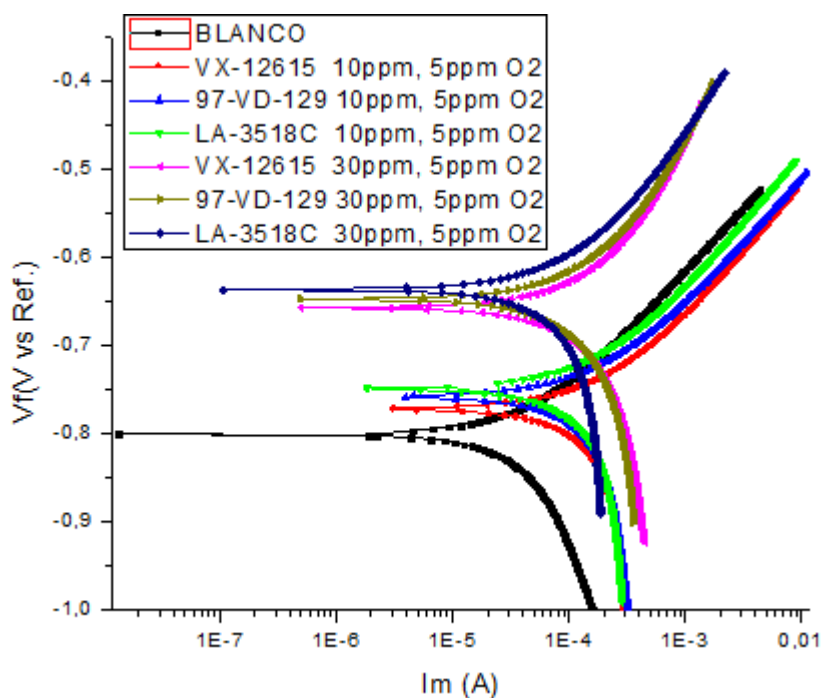
**Fuente:** Autor.

**Tabla 14.** Velocidades de corrosión y eficiencia a 80°C, 5ppm de O<sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm en el fluido TRS-N<sub>2</sub>.

T°	INHIBIDOR	MUESTRA DE FLUIDO	DOSIFICACION (ppm)	DOSIFICACION O <sub>2</sub> (ppm)	corrosion rate (mpy)	RP (ohms)	I corr (µa)	% E CR =
80	BLANCO	TRS-N <sub>2</sub>	0	5	29,36	388,5	128,4	0
	LA-3518-C		10	5	14,65	490,3	96,96	50,1
	VX-12615		10	5	18,49	367,5	189,6	44,08
	97-VD-129		10	5	16,15	318,2	192,2	49,9
	LA-3518-C		30	5	10,44	467,9	39,47	64,44
	VX-12615		30	5	15,36	489,2	31,41	53,55
	97-VD-129		30	5	13,61	471,4	29,21	57,78

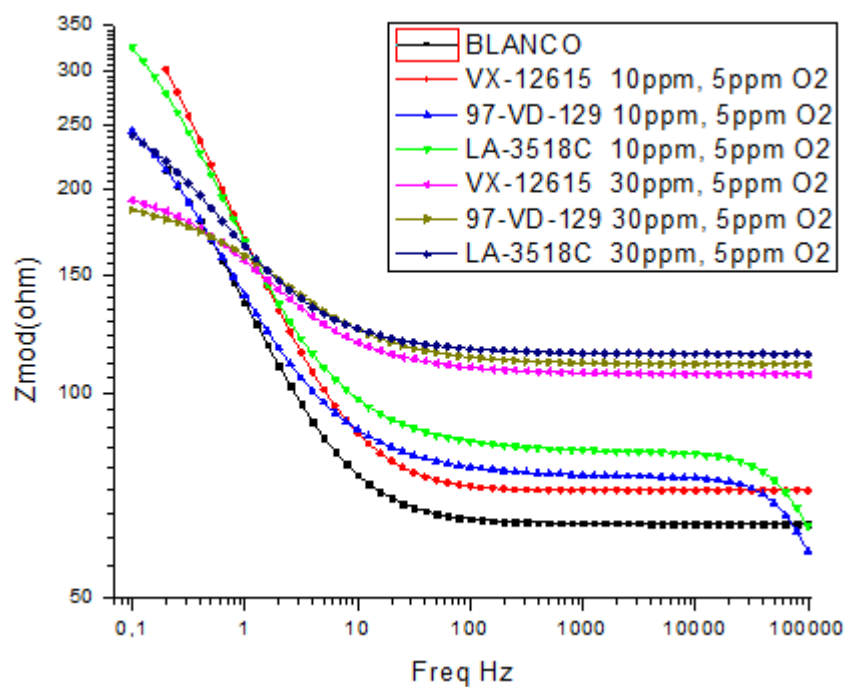
Fuente: Autor.

**Figura 35.** Curvas TAFEL a 80°C, 5ppm de O<sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



Fuente: Autor.

**Figura 36.** Curvas EIS a 80°C, 5ppm de O<sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



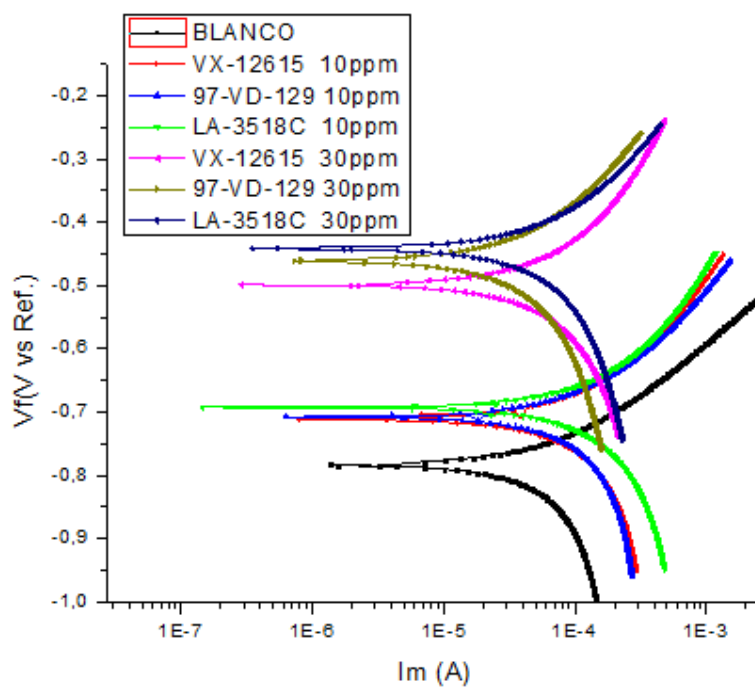
**Fuente:** Autor.

**Tabla 15.** Velocidades de corrosión y eficiencia a 70°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm en el fluido DGR 12.

T°	INHIBIDOR	MUESTRA DE FLUIDO	DOSIFICACION (ppm)	corrosion rate (mpy)	RP (ohms)	I corr (μa)	% E CR =
70	BLANCO	DGR-12	0	21,48	266,7	251	0
	LA-3518-C		10	7,69	247,3	239	64,19
	VX-12615		10	11,65	404	133,7	57,98
	97-VD-129		10	9,86	382	154,7	61,11
	LA-3518-C		30	4,45	317,5	202,5	79,28
	VX-12615		30	9,42	431,7	94,55	65,55
	97-VD-129		30	7,12	291,5	145,2	71,92

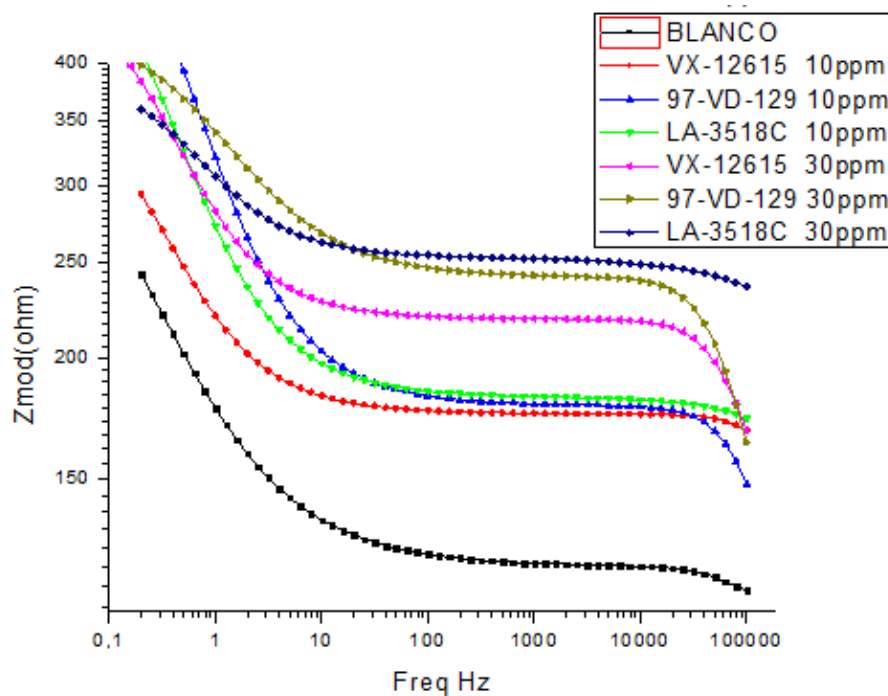
**Fuente:** Autor.

**Figura 37.** Curvas TAFEL a 70°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



**Fuente:** Autor.

**Figura 38.** Curvas EIS a 70°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



**Fuente:** Autor.

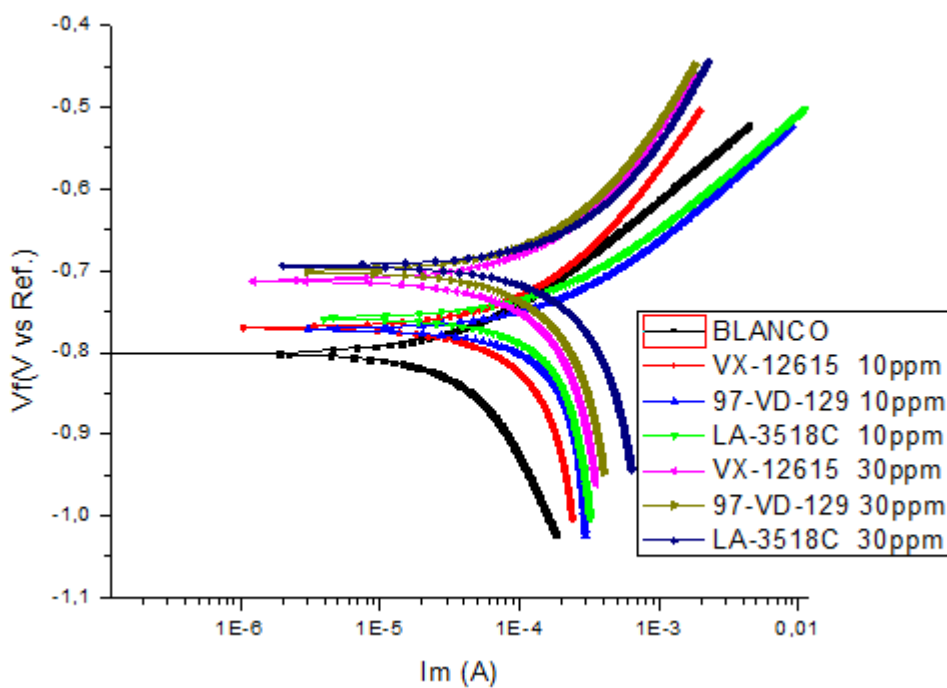


**Tabla 16.** Velocidades de corrosión y eficiencia a 80°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm en el fluido DGR 12.

T°	INHIBIDOR	MUESTRA DE FLUIDO	DOSIFICACION (ppm)	corrosion rate (mpy)	RP (ohms)	I corr (μa)	% E CR =
80	BLANCO	DGR-12	0	24,65	261	204,1	0
	LA-3518-C		10	9,23	396	141,1	62,55
	VX-12615		10	13,56	580,9	79,56	56,59
	97-VD-129		10	12,89	756,9	77,66	56,2
	LA-3518-C		30	7,32	362,5	127,8	70,3
	VX-12615		30	11,35	557,7	75,87	63,66
	97-VD-129		30	10,15	737,2	50,59	65,51

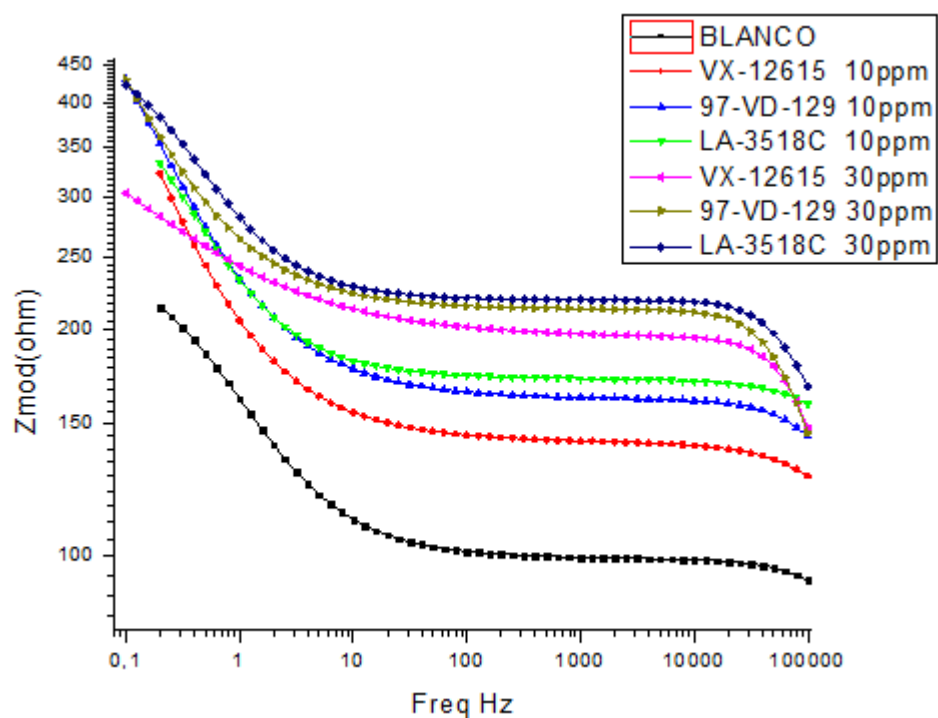
**Fuente:** Autor.

**Figura 39.** Curvas TAFEL a 80°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



**Fuente:** Autor.

**Figura 40.** Curvas EIS a 80°C y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



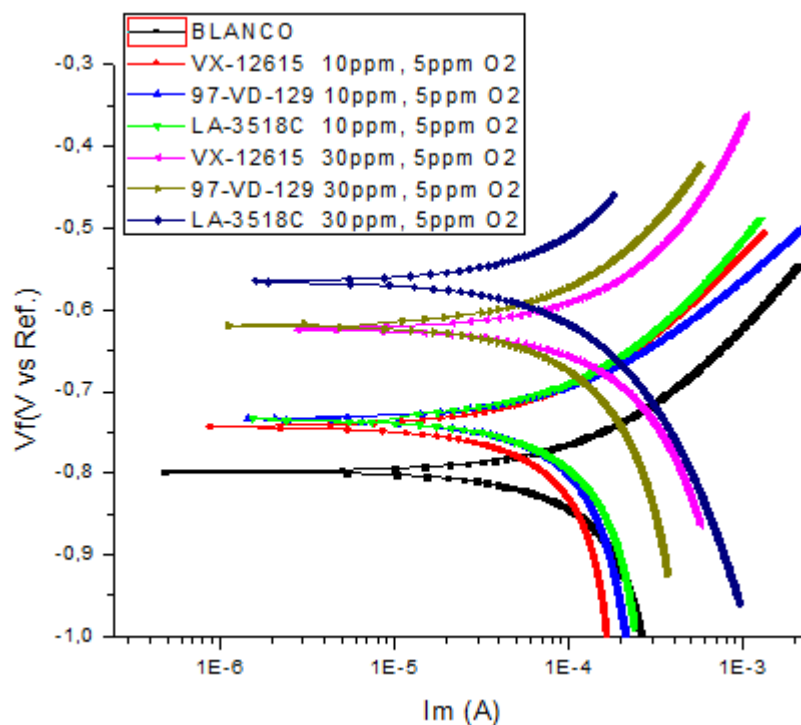
**Fuente:** Autor.

**Tabla 17.** Velocidades de corrosión y eficiencia a 70°C, 5ppm de O<sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm en el fluido DGR 12.

T°	INHIBIDOR	MUESTRA DE FLUIDO	DOSIFICACION (ppm)	DOSIFICACION O <sub>2</sub> (ppm)	corrosion rate (mpy)	RP (ohms)	I corr (μa)	% E CR =
70	BLANCO	DGR-12	0	5	27,45	154,8	375,2	0
	LA-3518-C		10	5	10,65	174,6	320,9	61,2
	VX-12615		10	5	16,36	245,5	185,4	49,61
	97-VD-129		10	5	13,75	246,8	230,7	53,46
	LA-3518-C		30	5	8,32	263,5	213,3	69,69
	VX-12615		30	5	14,45	297,4	176,3	55,49
	97-VD-129		30	5	11,23	275,3	209	62,4

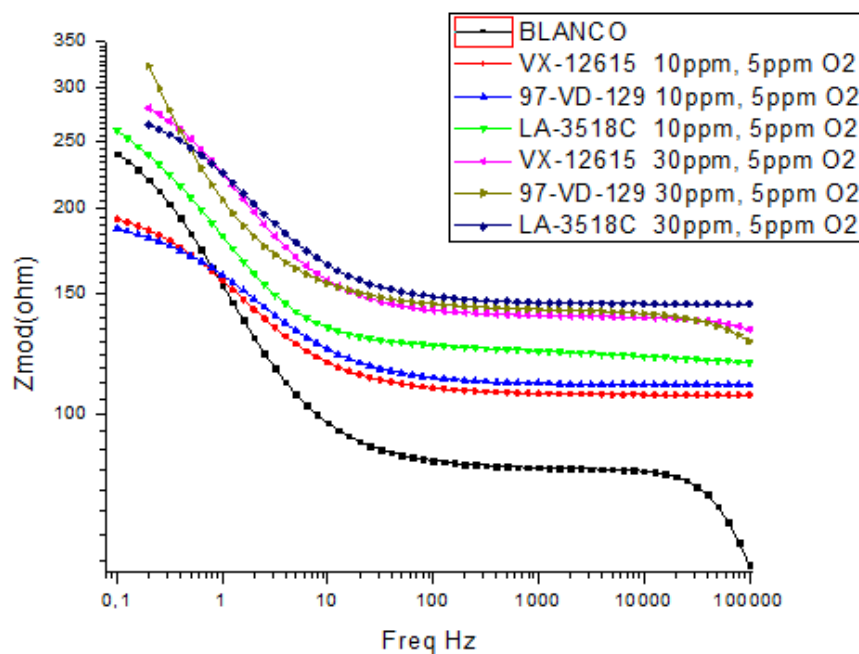
**Fuente:** Autor.

**Figura 41.** Curvas TAFEL a 70°C, 5ppm de O<sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



**Fuente:** Autor.

**Figura 42.** Curvas EIS a 70°C, 5ppm de O<sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



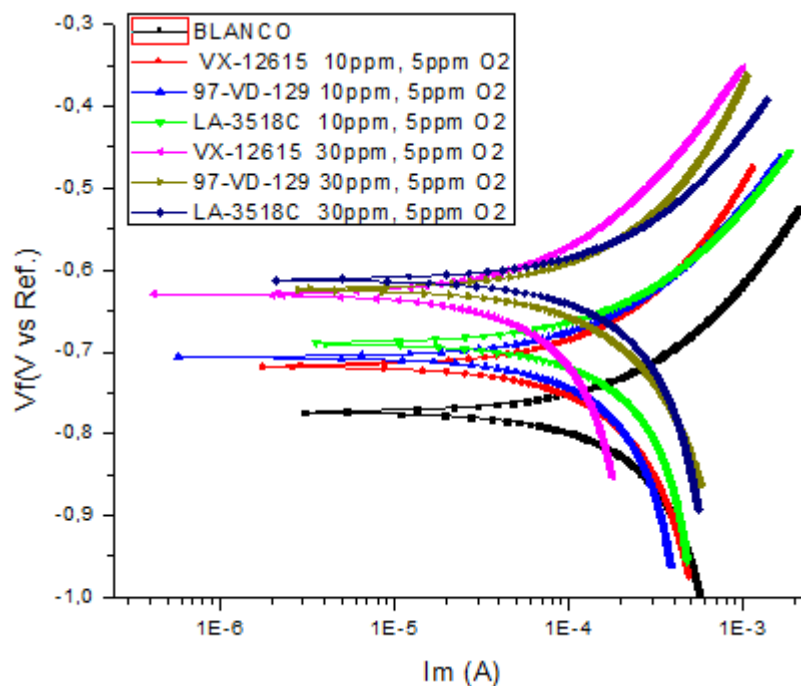
**Fuente:** Autor.

**Tabla 18.** Velocidades de corrosión y eficiencia a 80°C, 5ppm de O<sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm en el fluido DGR 12.

T°	INHIBIDOR	MUESTRA DE FLUIDO	DOSIFICACION (ppm)	DOSIFICACION O <sub>2</sub> (ppm)	corrosion rate (mpy)	RP (ohms)	I corr (µa)	% E CR =
80	BLANCO	DGR-12	0	5	30,42	195,9	259,8	0
	LA-3518-C		10	5	12,78	231,6	220,3	57,98
	VX-12615		10	5	17,35	245,6	236,8	45,69
	97-VD-129		10	5	14,69	240,5	202,6	52,94
	LA-3518-C		30	5	9,53	199,5	87,38	68,67
	VX-12615		30	5	15,21	417,6	127,9	52,39
	97-VD-129		30	5	12,96	258,4	197,3	58,48

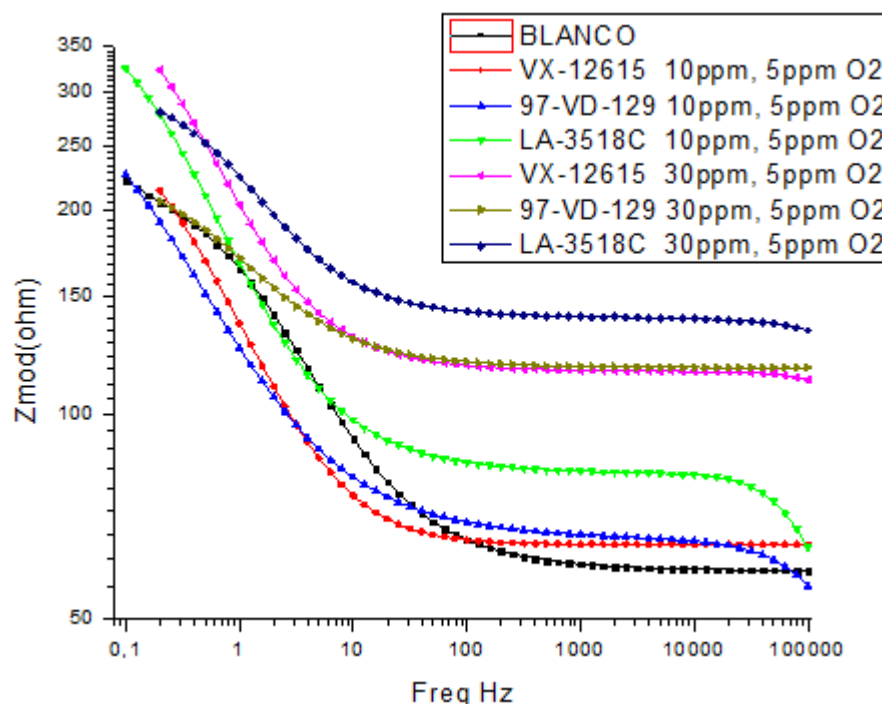
Fuente: Autor.

**Figura 43.** Curvas TAFEL a 80°C, 5ppm de O<sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



Fuente: Autor.

**Figura 44.** Curvas EIS a 80°C, 5ppm de O<sub>2</sub> y dosificaciones de 10 y 30 ppm.



**Fuente:** Autor.

### 3.5.1 Análisis de tablas, graficas TAFEL y EIS.

Las Figuras anteriores muestran el efecto de la concentración del inhibidor sobre la velocidad de corrosión del acero API N80 al adicionar diferentes dosificaciones de inhibidor. Los resultados de los ensayos para el acero al API N 80, confirman la inhibición de los procesos de corrosión, por la disminución de la velocidad de corrosión, a medida que aumenta la concentración del inhibidor en la solución. El efecto del inhibidor redujo la velocidad de corrosión. Los valores de los parámetros electroquímicos calculados a las diferentes concentraciones de inhibidor bajo las dos diferentes temperaturas, indican que:

A 70 °C se presenta una eficiencia mínima del de 42,63 %, a 10ppm de dosificación, conforme aumenta la dosificación del inhibidor, se incrementa la eficiencia a u máximo de 66,94 a 30ppm de dosificación en el fluido CCS-12 (Tabla 7) (Figura 21,22)

A 70 °C se presenta una eficiencia mínima del de 51,67 %, a 10ppm de dosificación, conforme aumenta la dosificación del inhibidor, se incrementa la eficiencia a u máximo de 73,93 a 30ppm de dosificación en el fluido TRS-N2 (Tabla 11) (Figura 29,30)

A 70 °C se presenta una eficiencia mínima del de 57,98 %, a 10ppm de dosificación, conforme aumenta la dosificación del inhibidor, se incrementa la eficiencia a u máximo de 79,28 a 30ppm de dosificación en el fluido DGR-12 (Tabla 15) (Figura 37,38)

Sin embargo, conforme aumenta la temperatura, la eficiencia disminuye, teniendo como resultado lo siguiente:

A 80 °C se presenta una eficiencia mínima del de 37,1 %, a 10ppm de dosificación, conforme aumenta la dosificación del inhibidor, se incrementa la eficiencia a u máximo de 59,86 a 30ppm de dosificación en el fluido CCS-12 (Tabla 8) (Figura 23,24)

A 80 °C se presenta una eficiencia mínima del de 49,82 %, a 10ppm de dosificación, conforme aumenta la dosificación del inhibidor, se incrementa la eficiencia a u máximo de 70,74 a 30ppm de dosificación en el fluido TRS-N2 (Tabla 12) (Figura 31,32)

A 80 °C se presenta una eficiencia mínima del de 56,59 %, a 10ppm de dosificación, conforme aumenta la dosificación del inhibidor, se incrementa la eficiencia a u máximo de 70,3 a 30ppm de dosificación en el fluido DGR-12 (Tabla 16) (Figura 39,40)

En cuanto al comportamiento del acero API N 80 con dosificaciones de 5ppm de O<sub>2</sub>, se evidenció más baja velocidad de corrosión de este estudio. El efecto del inhibidor redujo la velocidad de corrosión, teniendo como resultado lo siguiente:

A 70 °C y dosificación de 5ppm de O<sub>2</sub> se presenta una eficiencia mínima del de 34,4 %, a 10ppm de dosificación, conforme aumenta la dosificación del inhibidor, se incrementa la eficiencia a u máximo de 56,51 a 30ppm de dosificación en el fluido CCS-12 (Tabla 9) (Figura 25,26)

A 70 °C y dosificación de 5ppm de O<sub>2</sub> se presenta una eficiencia mínima del de 48,96 %, a 10ppm de dosificación, conforme aumenta la dosificación del inhibidor, se incrementa la eficiencia a u máximo de 69,8 a 30ppm de dosificación en el fluido TRS-N2 (Tabla 13) (Figura 33,34)

A 70 °C y dosificación de 5ppm de O<sub>2</sub> se presenta una eficiencia mínima del de 49,61 %, a 10ppm de dosificación, conforme aumenta la dosificación del inhibidor, se incrementa la eficiencia a u máximo de 69,69 a 30ppm de dosificación en el fluido DGR-12 (Tabla 17) (Figura 41,42)

Sin embargo, conforme aumenta la temperatura, la eficiencia disminuye, teniendo como resultado lo siguiente:

A 80 °C y dosificación de 5ppm de O<sub>2</sub> se presenta una eficiencia mínima del de 31,88 %, a 10ppm de dosificación, conforme aumenta la dosificación del inhibidor, se incrementa la eficiencia a u máximo de 51,62 a 30ppm de dosificación en el fluido CCS-12 (Tabla 10) (Figura 27,28)

A 80 °C y dosificación de 5ppm de O<sub>2</sub> se presenta una eficiencia mínima del de 44,08 %, a 10ppm de dosificación, conforme aumenta la dosificación del inhibidor, se incrementa la eficiencia a u máximo de 64,44 a 30ppm de dosificación en el fluido TRS-N2 (Tabla 14) (Figura 35,36)

A 80 °C y dosificación de 5ppm de O<sub>2</sub> se presenta una eficiencia mínima del de 45,69 %, a 10ppm de dosificación, conforme aumenta la dosificación del inhibidor, se incrementa la eficiencia a u máximo de 68,67 a 30ppm de dosificación en el fluido DGR-12 (Tabla 18) (Figura 43,44)

Para todos los casos anteriores mencionados las eficiencias mínimas siempre se dieron en el inhibidor VX-12615 quien en los diferentes comportamientos tanto de temperatura, dosificación de inhibidor y dosificación de O<sub>2</sub> obtuvo el peor comportamiento.

Para todos los casos anteriores mencionados las eficiencias máximas siempre se dieron en el inhibidor LA-3518-C quien en los diferentes comportamientos tanto de temperatura, dosificación de inhibidor y dosificación de O<sub>2</sub> obtuvo el mejor comportamiento.

Así mismo se evidencia que el fluido DGR-12 quien en los diferentes comportamientos tanto de temperatura, dosificación de inhibidor y dosificación de O<sub>2</sub> obtuvo el mejor comportamiento y las mayores eficiencias de los tres inhibidores evaluados y el fluido CCS-12 obtuvo el peor comportamiento y las menores eficiencias de los tres inhibidores evaluados

Las curvas de polarización anódica y catódica del acero API N80, con diferentes dosificaciones de inhibidor, fueron trazadas a 5mV/10min y se muestran en la Figuras anteriores. Los parámetros electroquímicos, potencial de corrosión (E<sub>corr</sub>), densidad de corriente de corrosión (I<sub>corr</sub>), constante anódica de Tafel β<sub>a</sub>, constante catódica de Tafel β<sub>c</sub>, velocidad de corrosión y eficiencia de inhibición fueron calculadas y se muestran en las Tablas anteriores.

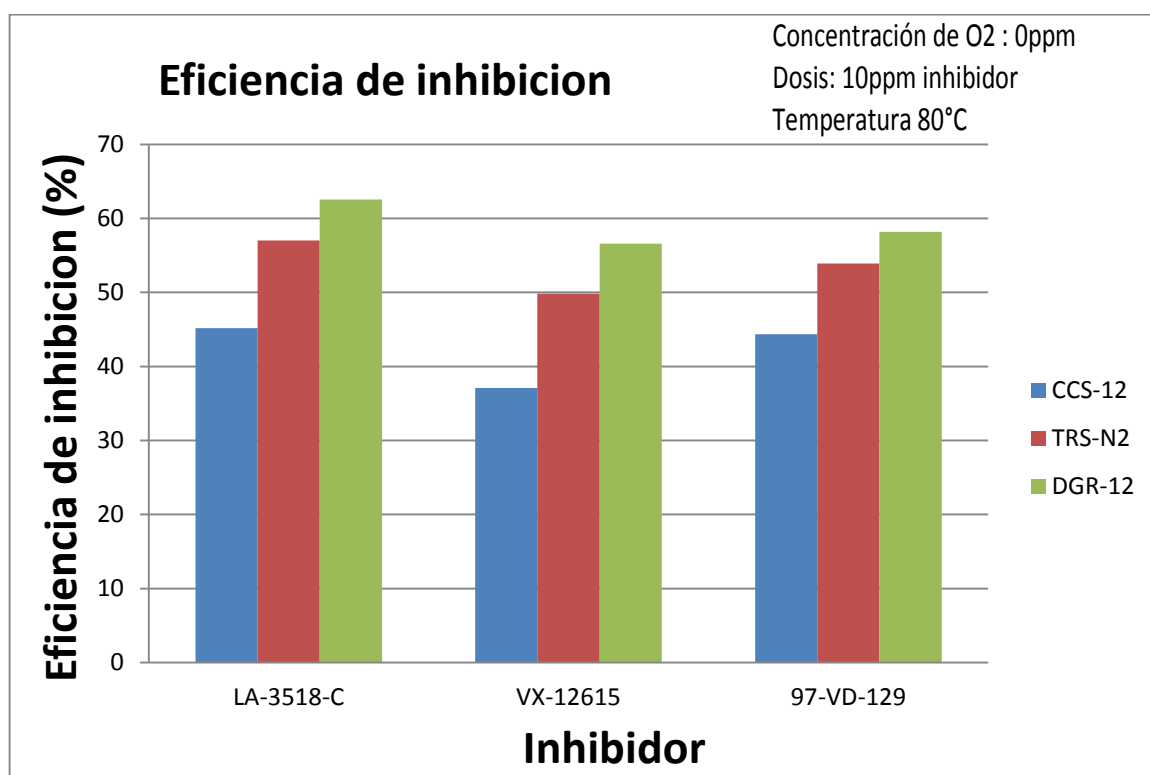
### **3.6 ANALISIS GRAFICA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS**

Los resultados obtenidos evidencia que para el inhibidor LA-3518-C, la eficiencia de inhibición se encuentra en valores cercanos al 70% de protección, lo cual establece que a estas condiciones la transferencia de carga está presente como para que inhibidor la contrarreste totalmente los mecanismos de daño en

concentración casi nulos de oxígeno, el estudio también determina que el electrolito CCS-12 contiene parámetros fisicoquímicos más agresivos que los demás, permitiendo un deterioro mayor en la superficie de la probeta.

Se realiza el análisis de la variable respuesta (eficiencia de inhibición) y la cada uno de los inhibidores, los cuales fueron dosificados en fluidos de producción, como se presenta en la gráfica 6.

**Gráfica 6.** Eficiencia de inhibición para una dosificación de 10 ppm de inhibidor, 0 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C.



**Fuente:** Autor.

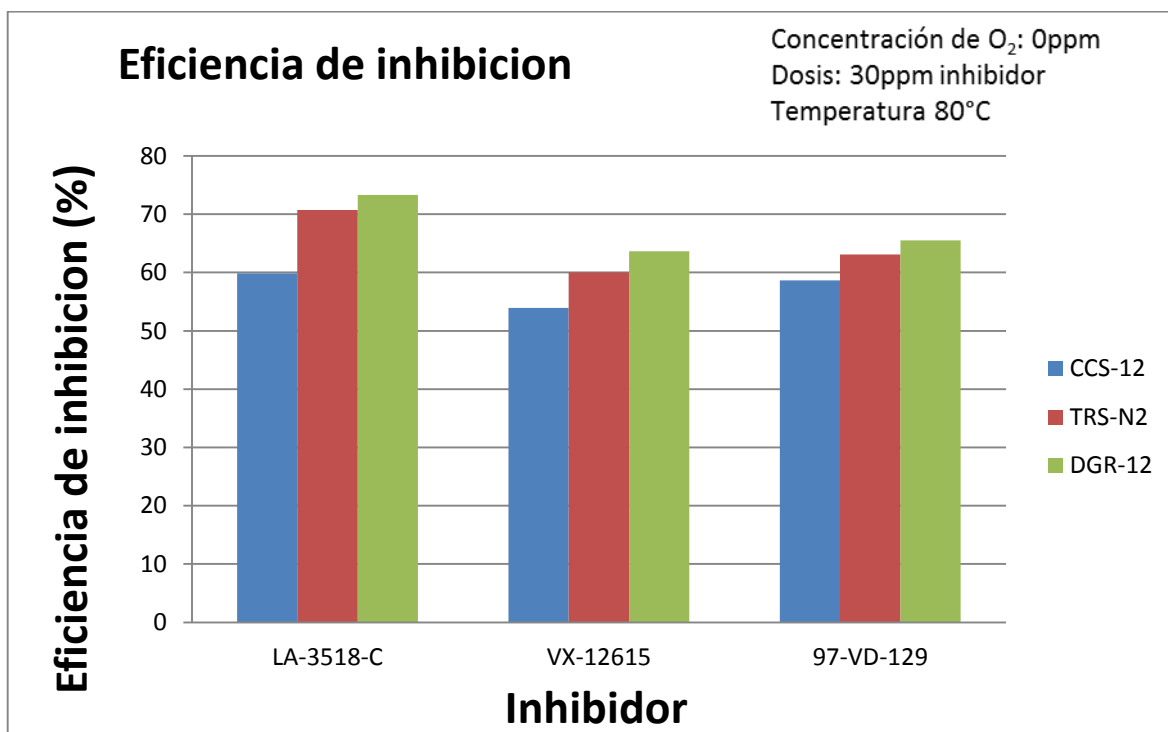
Se observa que la eficiencia de inhibición está influenciada directamente por la dosificación; el comportamiento es creciente al aumentar la concentración del inhibidor, se observa que al mantener una temperatura de 80°C, presenta una tendencia protectora mayor, a diferencia cuando se tiene una dosificación 10 ppm de inhibidor.

Como se evidencia en la gráfica 7, el inhibidor LA-3518-C, presenta un comportamiento más favorable para contrarrestar mecanismos de corrosión,



seguido por el inhibidor 97-VD-129 y por último el inhibidor VX-12615, en el cual se observa una disminución de su característica protectora con respecto a los demás inhibidores evaluados, en este caso el fluido de producción CCS-12 continua siendo el electrolito que causa un deterioro mayor.

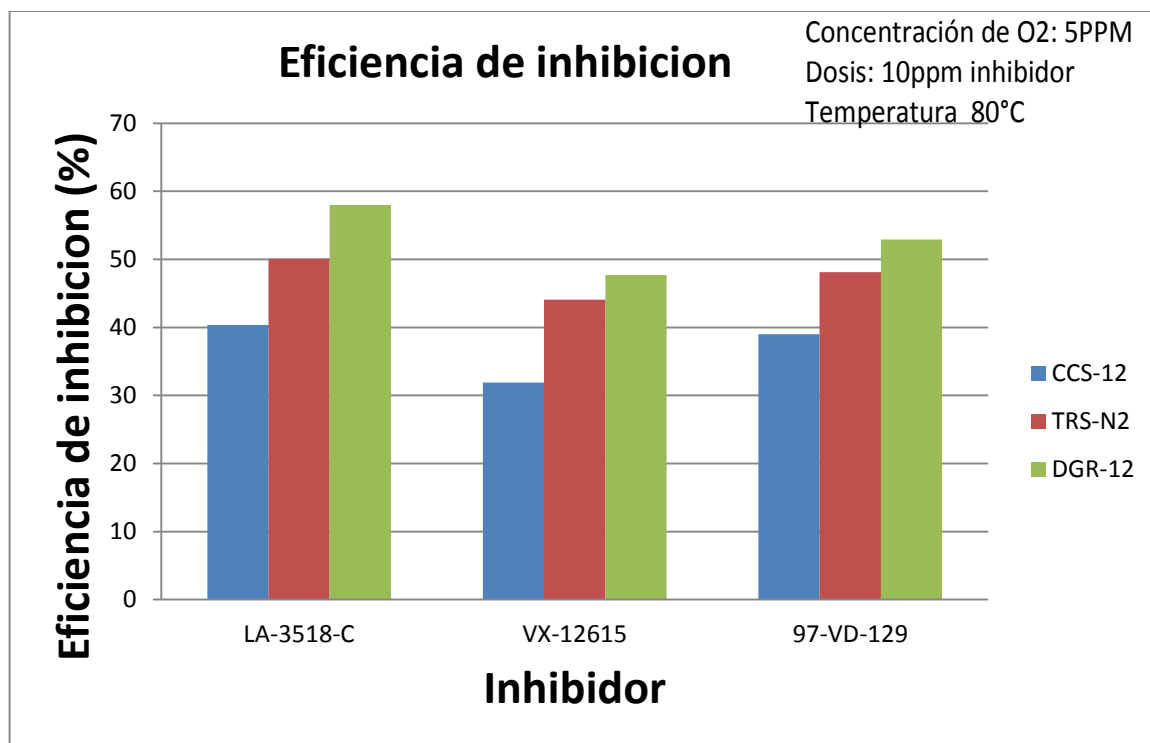
**Gráfica 7.** Eficiencia de inhibición para una dosificación de 30 ppm de inhibidor, 0 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C.



**Fuente:** Autor.

Se observa en la gráfica 8, que el inhibidor VX-12615 posee comportamiento de menor característica protectora debido a que son las condiciones que menos favorecen el comportamiento idóneo del inhibidor, con presencia de oxígeno y con una dosificación de inhibidor mínima, ya que evidencia que no supera porcentajes de eficiencia de 40 %, lo cual establece que el inhibidor tiene un desempeño débil cuando se encuentra en presencia de oxígeno. También se evidencia que el fluido CCS-12, contiene fisicoquímicos que no favorecen al buen comportamiento del inhibidor, teniendo como resultado las eficiencias más bajas de la investigación siendo esta del 31,88% del inhibidor VX-1218-C.

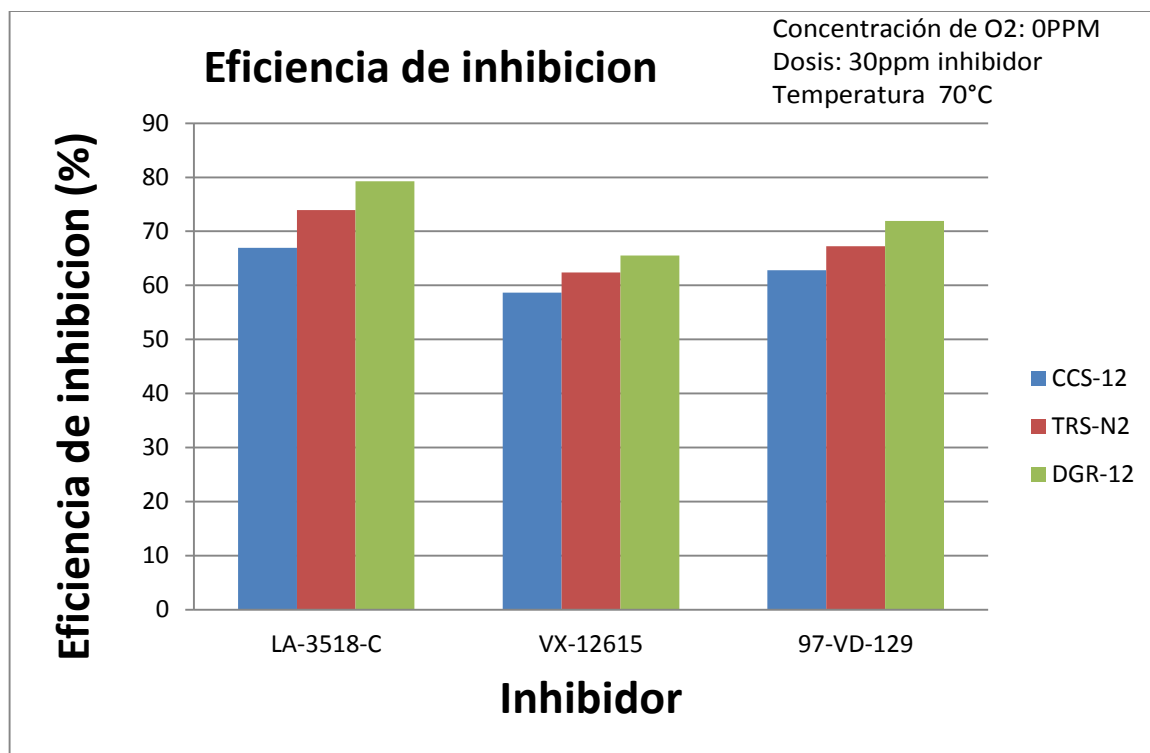
**Gráfica 8.** Eficiencia de inhibición para una dosificación de 10 ppm de inhibidor, 5 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C.



**Fuente:** Autor.

Se evidencia en la gráfica 9 que la temperatura de 70°C, con concentración de 30ppm presentan la mayor eficiencia de inhibición, generando mecanismo que permiten que el inhibidor tenga un comportamiento protector en niveles que favorezcan la preservación de la probeta metálica, estableciendo que para condiciones críticas se podría elevar la concentración de inhibidor permitiendo cubrir un área mayor de la superficie sin que se degrade. Se ve que como en todos los casos el inhibidor LA-3518-C se comporta mejor y con estas condiciones llega a la eficiencia máxima de la investigación siendo esta del 79,28 % en el fluido DGR-12.

**Gráfica 9.** Eficiencia de inhibición para una dosificación de 30 ppm de inhibidor, 0 ppm de Oxígeno y temperatura de 70 °C.

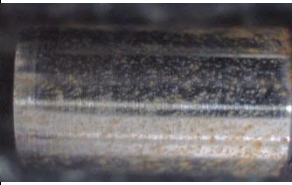

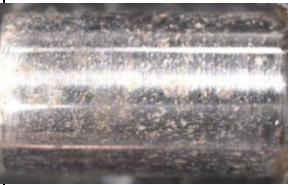

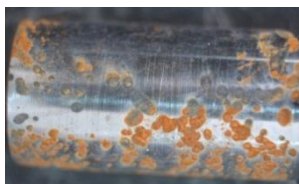



**Fuente:** Autor.

### 3.7 APARIENCIA SUPERFICIAL DE LAS PROBETAS



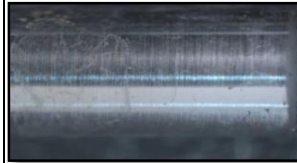



A continuación (Tabla 19) se presenta la apariencia superficial de la probetas que usaron para las pruebas en condición (80 °C, 0 y 5 ppm de O<sub>2</sub>, 0, 10 y 30 ppm de inhibidor), para cada una de las dosificaciones de inhibidor y concentración de oxígeno, siendo el inhibidor evaluado en este caso (LA-3518-C.), se evidencia que la presencia de oxígeno permite obtener un morfología característica de este tipo de corrosión generando color rojizo.

**Tabla 19.** Apariencia superficial inhibidor LA-3518-C.

APARIENCIA SUPERFICIAL INHIBIDOR LA-3518-C			
CONCETRACIÓN DE OXIGENO	0 ppm	10 ppm	30 ppm
0 ppm			
5 ppm			

**Fuente:** Autor.



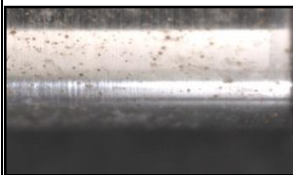



**Tabla 20.** Apariencia superficial Inhibidor VX-12615

APARIENCIA SUPERFICIAL INHIBIDOR VX-12615			
CONCETRACIÓN DE OXIGENO	0 ppm	10 ppm	30 ppm
0 ppm			
5 ppm			

**Fuente:** Autor.

Se presenta la (Tabla 20) se presenta la apariencia superficial de la probetas que usaron para las pruebas en condición (0 °C, 0 y 5 ppm de O<sub>2</sub>, 0, 10 y 30 ppm de inhibidor), para cada una de las dosificaciones de inhibidor y concentración de oxígeno, siendo el inhibidor evaluado en este caso (VX-12615).

**Tabla 21.** Apariencia superficial Inhibidor 97-VD-129.

APARIENCIA SUPERFICIAL INHIBIDOR 97-VD-129			
CONCETRACIÓN DE OXIGENO	0 ppm	10 ppm	30 ppm
0 ppm			
5 ppm			

**Fuente:** Autor.

La apariencia superficial en la Tabla 21, mostrándose las probetas que usaron para las pruebas en condición (80 °C, 0 y 5 ppm de O<sub>2</sub>, 0, 10 y 30 ppm de inhibidor), para cada una de las dosificaciones de inhibidor y concentración de oxígeno, siendo el inhibidor evaluado en este caso (97-VD-129).

#### 4. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos por medio de Curvas de Polarización Potenciodinámicas y Espectroscopia de Impedancia Electrónica, presentan una tendencia similar, conforme aumenta la concentración de inhibidor, aumenta la eficiencia.
- La máxima eficiencia, se obtuvo en el inhibidor LA-3518C con dosificación de 30 ppm y una temperatura de 70°C en el fluido DGR 12.
- A partir del estudio fisicoquímico se establece que el inhibidor posee mayor concentración a menor temperatura y sin la presencia de O<sub>2</sub>, estas sustancias promueve la formación de quelatos con los iones férricos y ferrosos que se desprenden del acero al entrar en contacto con la solución.
- la velocidad de corrosión de los blancos fue mucho mayor que la de las probetas de prueba sumergidas en solución en presencia de inhibidores. Esto sugiere que actuaron como inhibidores de corrosión.
- En general las eficiencias de inhibición aumentaron con la concentración del inhibidor en el medio corrosivo. Este comportamiento se atribuye al aumento de la superficie recubierta, debido al incremento del número de moléculas de inhibidor adsorbidas en la superficie metálica.
- Al comparar las eficiencias de inhibición en acero API N80, se halla que los porcentajes obtenidos son bastante altos: LA-3518C 79,28%, VX-12615 65,55% Y 97-VD 129 71,92% respectivamente lo que revela el alto potencial que posee cada inhibidor para ser usado como inhibidor de corrosión a nivel de la industria.
- En cuanto al mejor fluido que se comportó en los tres inhibidores fue el fluido DGR12 donde se obtuvo el porcentaje mayor de eficiencia; este comportamiento refleja la habilidad del fluido para inhibir la corrosión del acero API N80 en solución.
- Debido a las eficiencias altas encontradas para los inhibidores de corrosion, algunas superior a los 70%, se puede demostrar la importancia de esta investigación, así como el potencial que estos tienen, generando un aporte a la aplicación de estos inhibidores a nivel de la industria.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- H. H. Uhlig. Uhlig's Corrosion Handbook 2da ed. ed. R. W. R John Wiley & Sons, Londres, 2000.
- R. Gutierrez, M: A: Peláez, R: A: Vázquez, S: Bernes, Y. Reyes New Palladium Complexes derived from  $\alpha$ - (phenylethylimino) benzyl phenyl ketone. 6th FIGIPS Meeting in Inorganic Chemistry. Trabajo No. PC. 006 Barcelona-Spain, 2001.
- M. A. Veloz Rodríguez "Mecanismos de corrosión de acero al carbón en una solución amortiguadora de ácido acético, cloruros y H<sub>2</sub>S" Tesis Doctoral, UAMI, 2003.
- R. L. Camacho Mendoza "Estudio teórico de  $\alpha$ - diiminas sustituidas y su interacción metal-ligante con superficies metálicas de hierro" Tesis de Maestría, UAEH, 2007.
- Jiang X., Zheng Y. and Ke W.: "Corrosion Inhibitor Performances for Carbon Dioxide Corrosion of N80 Steel Under Static and Flowing Conditions" Corrosion, Vol 61. No 4. (2005) 326-334.
- McMahon A.J.and Groves S.: "Corrosion Inhibitor Guidelines. A practical guide to the selection and deployment of corrosion inhibitors in oil and gas production facilities" BP (1995) 23-45.
- Seal S., Sapre K., Desai V. and Gopal M.: "Effect of Multiphase Flow on Corrosion of C-Steel in Presence of Inhibitor: A Surface Morphological and Chemical Study". Pergamon. Corrosion Science. Vol 42, (2000) 1623-1634.
- M. Stern and A.L. Geary,"Electrochemical polarizacion. I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves". J. Electrochem. Soc. 1957.
- Juttner, K.: Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) of corrosion process on inhomogeneous surfaces. Electrochimica Acta, vol. 35, nº 10.
- Macdonald, J.R.; Johnson, W.B.: Fundamentals of impedance spectroscopy. Barsoukov, E.; Macdonald, J.R. (editores). Impedance Spectroscopy. Theory, experiment and applications, 2ª Edición. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- Mansfeld, F.; Shih, H.; Tsai, C.H.: Análisis of EIS data por common corrosion proceses. Scully, J.R.; Silverman, D.C.; Kendig, M.W. (editores).

Electrochemical impedance. Análisis and interpretation. Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 1993.

- M. Sc. Bibiana Sandianes-Vegal , bibiana@cidci.cu, Dr. Jorge Uruchurtu-ChavarínII, juch25@uaem.mx, Dr. Osmar Calderón-SecadaIII, Dr. Osmar Calderón-SánchezIV I Centro de Investigación y Desarrollo del Comercio Interior (CID-CI), La Habana, Cuba, IIUniversidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Cuernavaca, Morelos, México, IIIEmpresa Gestión del Conocimiento y la Tecnología (GECYT), La Habana, Cuba, IVFacultad de Química de la Universidad de La Habana, Cuba. 2011
- Reyes Cruz Víctor Esteban Evaluación de compuestos orgánicos como inhibidores de corrosión en medio ácido. XX Congreso Nacional de la SMEQ; Puente de Ixtla, Morelos del 22 al 27 de Mayo del 2005. (ISBN 9709911015) O. Alvarado Cortés, M. A. Veloz Rodríguez, R. Martínez Palou, V. E Reyes Cruz. 2005
- Pech-Canul Máximo A.\* , González Dzul Carlos E. Departamento de Física Aplicada, Cinvestav-Mérida, Km 6 ant. Carr. a Progreso, Ap 73 Cordemex, CP 97310, Mérida, Yuc., México.2007.
- ASTM E 3. Standard guide for preparation of metallographic specimens.
- ASTM E 45. Standard test methods for determining the inclusion content of steel.
- ASTM E 8. Standard test methods for tension testing of metallic materials.
- ASTM E 384. Standard test method for microindentation hardness of materials.
- ASTM E 415. Standar test method for optical emission vacuum spectrometric analysis of carbon and low-alloy steel.